



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Прогноз осадков с использованием мезомасштабной модели WRF-
ARW для Бурунди»

Исполнитель **Нсабимана Шабани**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 01 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 .ОПИСАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	7
1.1 Географическое описание территории исследования.....	7
1.2 Данные используемые в исследовании	8
1.2.1 Климатология осадков	10
1.2.2. Данные по станциям	11
2 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В БУРУНДИ.....	23
2.1 Модель Немецкой метеорологической службы (DWD) ICON	23
2.2 Модель NCEP GFS	24
2.3 Модель Метеорологического Бюро Великобритании – UKMO	24
2.4 Модель ECMWF	25
2.5 Система мультимодельного ансамблевого прогноза Mydewetra.....	26
3. МЕЗОМАСШТАБНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ WRF-ARW	30
3.1 Описание модели.....	30
4 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСАДКОВ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ	41
4.1.Источники данных для верификации модели	51
4.2 Проверка осадков в погодных системах: определение систематических ошибок	54
4.3 Оценка качества прогноза осадков по градациям их интенсивности	59
4.3 Методика оперативного прогноза осадков	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	68
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	69
Приложение А Карта природных регионов Бурунди	69
Приложение В Таблица квадратных ошибок прогноза осадков (в мм) для территории Бурунди в марте 2024г по модели.....	71
Приложение Г Исходный код для визуализации данных на GrADS	72
Приложение Д.Исходный код для расчёта показателя матрицы сопряженности на .Python	73
Приложение Е Исходный код для получения координат узлов сетки на Фортран	76
Приложение Ж Форма задания данных для построения матрицы сопряженности.....	80

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BSF	Bias Score Frequency
DWD ICON	Deutscher Wetterdienst Icosahedral Nonhydrostatic
FAI	Forecast Accuracy Index
FAO(ФАО)	Food and Agriculture Organisation
GRIB1/2	General Regularly-distributed Information in Binary form.General Binary Representation.Gridded Binary 1/ 2 edition
GTOPO30	Global 30 Arc-Second Elevation
INSBU	Institut National de Statistiques du Burundi
JF	January-February
JJA	June-July-August
LES	Large Eddy Simulation
MAM	March-April-May
MET	Model Evaluation Tools
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer
MSE	Mean Squared Error
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP-GFS	National Centers for Environmental Predictions
RIP4	Read/Interpolate/Plot version 4
RMSE	Root Mean Squared Error(Среднеквадратичная ошибка)
SOND	September-October-November-December
STATSGO	State Soil Geographic Database
TKE	Turbulent Kinetic Energy
UKMO	United Kingdom Meteorological Office
USGS 24	US Geological Survey 24-category
VAPOR	Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers

UTC	Universal Time Coordinated
WENO	Weighted essentially non-oscillatory
WPS	WRF Preprocessing System
WRF-ARW	Weather Research Forecast-Advanced Research Weather
WRFDA	WRF Data Assimilation
ВЗК	Внутритропическая зона конвергенции
ВМО	Всемирная Метеорологическая Организация
ООН	Организация Объединенных нации
РКИК ООН	Рамочная Конвенция ООН об Изменении Климата
ТКЭ	Турбулентная кинетическая энергия
ЧПП	Численные прогнозы погоды

ВВЕДЕНИЕ

Республика Бурунди это одна из самых значимых стран африканского континента, а её экономика в большей степени базируется на сельском хозяйстве. Прогностическая информация о наличии или отсутствии осадков, а также о их количестве, позволит потребителям планировать свою деятельность. Поскольку в Бурунди осадки могут иметь катастрофический характер, то прогнозы осадков необходимы и министерству гражданской обороны для планирования спасательных операций и оказания помощи населению, оказавшемуся на затопленных территориях. Важность разработки методов прогнозов осадков возросла в последние десятилетия в связи с изменением климата. Долгосрочные прогнозы осадков необходимы правительственным органам для выработки и реализации адаптационных мероприятий.

Всё вышеперечисленное определяет актуальность данного исследования, которое посвящено изучению климатологии осадков Бурунди и разработке модели гидродинамического моделирования осадков.

Целью данной научно-исследовательской работы является разработка методики оперативного прогноза осадков для территории Бурунди на основе гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW

Для достижения поставленной цели работы были выполнены следующие задачи:

- Изучение климатологического режима осадков Бурунди;
- Адаптация и верификация модели WRF-ARW для моделирования процессов на территории Бурунди ;
- Формулировка методики оперативного гидродинамического прогноза осадков для использования в метеорологической службе Бурунди.

Выпускная квалификационная работа магистра (магистерская диссертация) состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В первой главе описание территории исследования.Здесь осываестя географическое расположение территории ,её климат.Описано исчотники климатических данных для данной территории.Показано расположение метеорологических станции данные с которых использовались для описания климатологии осадков.

Во второй главе описано основные модели прогноза погоды используемые в гидрометеоролометеорологическом службе Бурунди.Показаны особенности кождой модели и основные продукты.Тут описано подробно мультимодельная система прогноза сильных дождей.

В третей главе описана мезомасштабная модель,и её место использования при исследвании атмосферных процессов и явлений.Подробно описаны этапы запуска модели и источник данных для начальных условий.

В четвертой главе вложенны результаты исследования.Результаты численных эксперимента над территории и методы их верификации.Подробно описано данные наблюдения для верификации.

Список использованных источников содержит восемь наименований.

1 .ОПИСАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Географическое описание территории исследования

Расположенная в центре Африки, Республика Бурунди является частью Центральной Африки, но связана с Восточной Африкой своим рельефом и климатом. Расположена в 3800 км от Средиземного моря, в 3500 км от Кейптауна, в 2200 км от Атлантического океана. и 1200 км от Индийского океана (рисунок 1.1).

Бурунди расположена между $2^{\circ}45'$ и $4^{\circ}26'$ южной широты, $28^{\circ}50'$ и $30^{\circ}53'$ восточной долготы и имеет площадь $27\,834\text{ км}^2$, из которых 1745 км^2 занимают воды озера Танганьика, граничащего с Демократической Республикой Конго на западе, на севере с Руандой, на востоке и юге с Танзанией. Республика Бурунди не имеет выхода к морю.

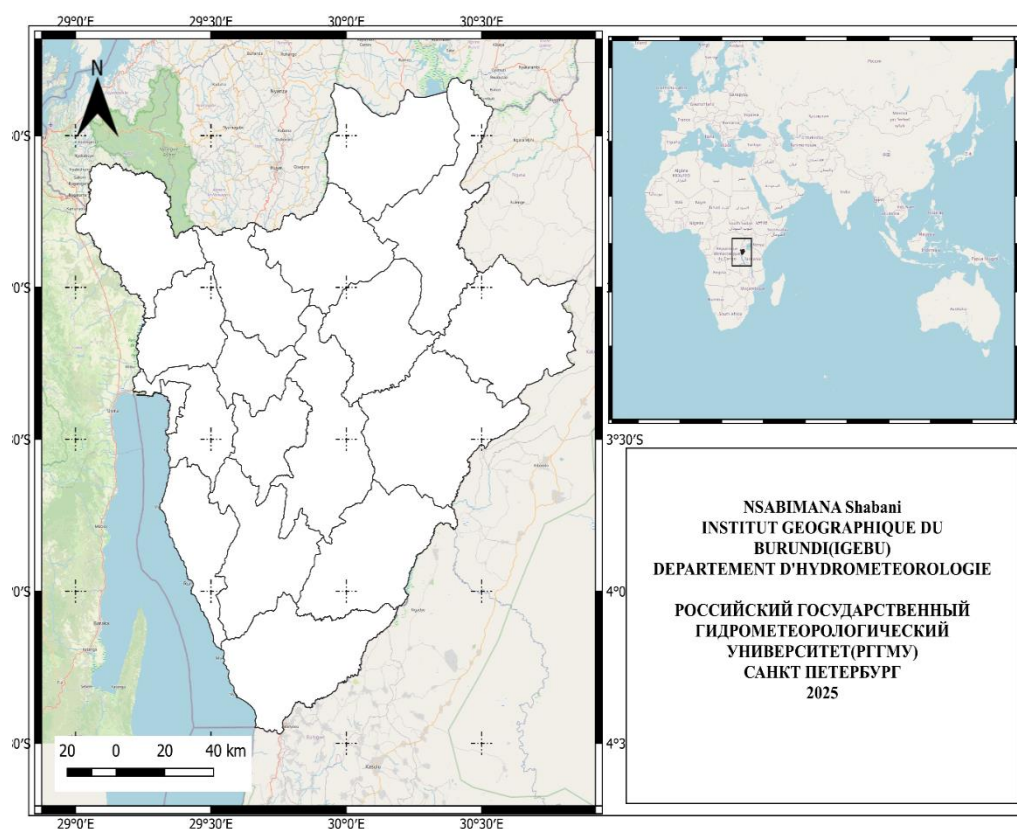


Рисунок 1.1 –Расположение Бурунди на карте Африки

Большая часть страны находится на высоте от 1500 до 2000 м над уровнем моря. Высота самых высоких вершин составляет 2670 м, самая низкая высота рельефа – 774 м, это средняя высота озера Танганьика.

Несмотря на свою широту, в стране преобладает умеренный тропический климат и с этим характерно чередование двух основных сезонов.

Республика Бурунди — преимущественно аграрная страна. Кофе, чай и хлопок составляют основные экспортные культуры и источники иностранной валюты для страны.

По оценкам, в 2024 году численность населения Бурунди составляла 12,332788 млн человек, а плотность населения — более 443 человек на км². Ежегодный прирост населения оценивается в 2,4%. Продолжительность жизни в 2018 году составила 61,2 года, уровень рождаемости — 37,9%, а в 2016 году в среднем на одну женщину приходилось 5,5 рождений (Мировой БАНК, 2022). Однако продовольственная безопасность сохраняется.

Серьезной проблемой, и в 2017 году шесть из десяти детей отставали в росте (Мировой БАНК, 2022). Показатели здоровья плохие. Уровень смертности среди детей в возрасте до пяти лет составляет 42,5 на 1000 живорождений. Заболеваемость малярией составляет 156,2 на 1000 человек, находящихся в группе риска. Риски стихийных бедствий реальны; 70% внутренних перемещений вызваны стихийными бедствиями (РКИК ООН, 2007).

1.2 Данные используемые в исследовании

Для описания климатологии территории исследования были использованы данные, полученные от географического института Бурунди. Это данные наблюдения осадков на станциях, распределенных по всей территории за 30 лет от 1991 до 2020г. Местоположение станций, данные с которых используются в исследовании представлены на рисунке 1.2.

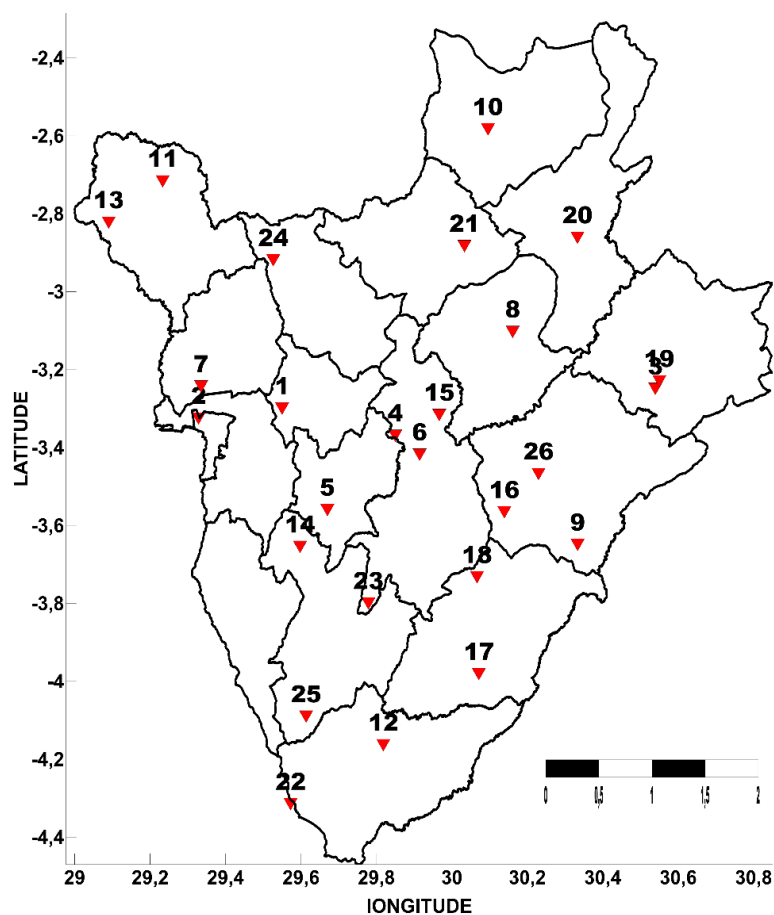


Рисунок 1.2 – Расположение станций, данные с которых использованы в исследовании

Данные о количестве осадков от Географического института Бурунди содержат информацию о.

- среднемесячных суммах осадков за период 1991-2020гг. для 26 станций
- суточных суммах осадков за март 2024г для 21 станций

1.3 Климатическое описание территории исследования

1.2.1 Климатология осадков

Для изучения климатических закономерностей полей осадков в Бурунди в данном исследовании использованы данные измерений на метеорологических станциях, предоставленные гидрометеорологическим департаментом Географического института Бурунди (<https://www.igebu.bi/>).

По данным наблюдений на разных станциях исследовано пространственно-временное распределение осадков.

На рисунке 1.3 представлено суммарное годовое количество осадков на территории Бурунди за период 1991 -2020 гг.

В Бурунди тропический дождливый климат с годовым количеством осадков от 700 (на востоке, около озера Танганьика) до 1800 (в горных районах центра страны) мм.

По полученным результатам можно сделать вывод о меридиональном распределении суммарных осадков. Выделяющийся регион (около станции номер 26) это горная местность со своим особым режимом осадков.

Проанализирован годовой ход суммарного количества осадков по всей территории Бурунди (рисунок 1.3) и для каждого региона отдельно. Временной ход суммарного количества осадков однотипен во всех регионах – минимум (практически полное отсутствие осадков) в июле и максимум в зимние месяцы.

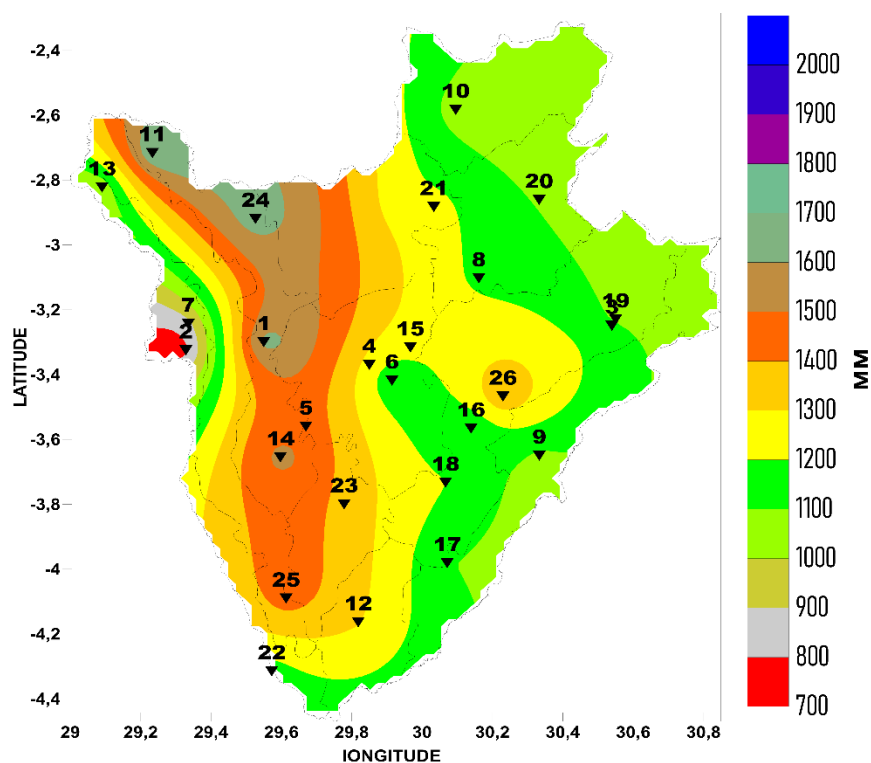


Рисунок 1.3 – .Суммарное годовое количество осадков (мм, период 1991-2020 гг.)

1.2.2. Данные по станциям

Климат Бурунди — влажный тропический, на который влияют высота над уровнем моря и времена года. Количество осадков увеличивается с высотой, с минимумом на равнине Русизи и максимумом в высокогорных районах. Среднегодовая температура снижается с высотой: самая жаркая зона на равнине Имбо, а самая холодная на равнине Рвегура.

Распределение осадков и температуры в Бурунди во многом зависит от рельефа. Существует пять климатических (эколого-климатических) зон или регионов, схема которых приведена на рисунке 1.4.

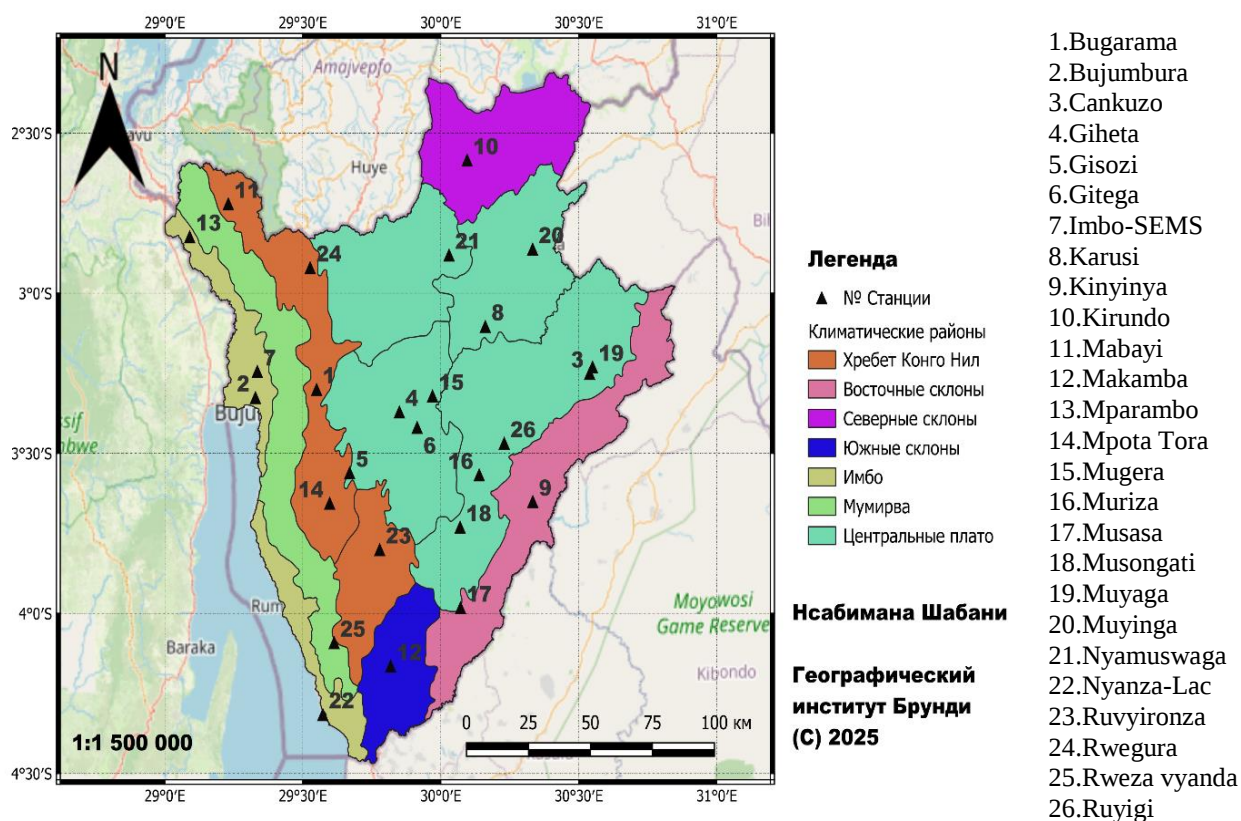


Рисунок 1.4 – Карта эколого-климатических регионов Бурунди со станциями

- Запад Хребта Конго-Нил (станция Мумирва). Предгорья, Западные уступы: образованы западным склоном самой горной местности, их высота колеблется от 1000 до 1500 м над уровнем. Годовое количество осадков колеблется от 1100 до 1800 мм, а температура колеблется от 23°C до 17°C в зависимости от высоты. Эта область занимает 10 процентов территории Республики Бурунди. График годового хода осадков приведён на рисунке 1.5.

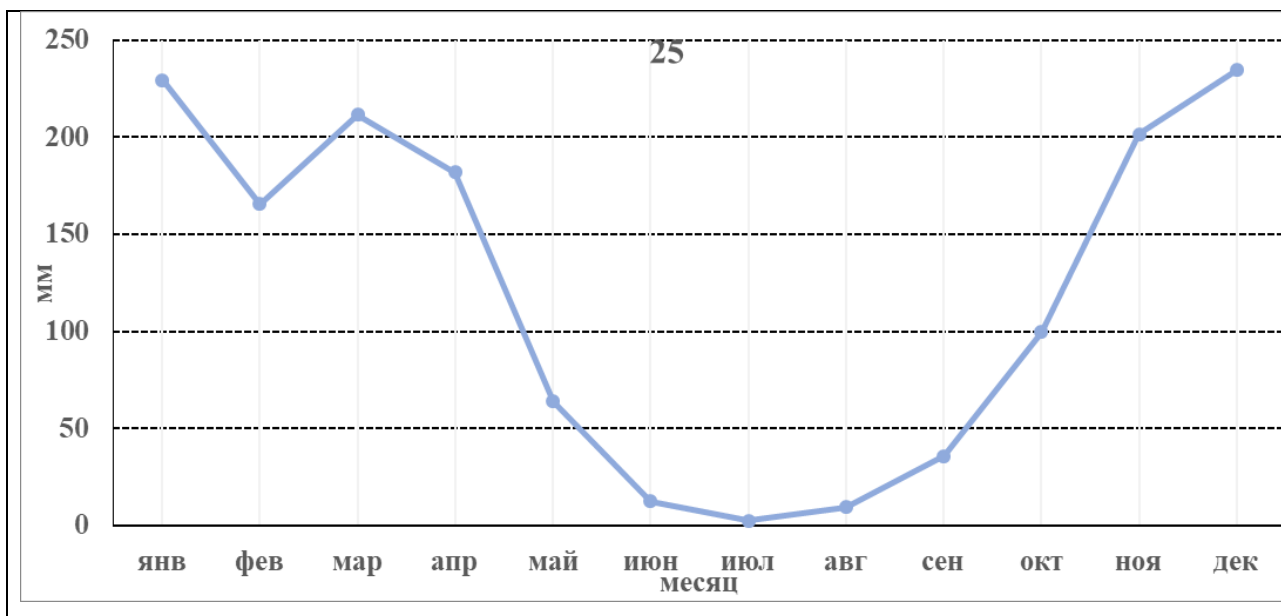


Рисунок 1.5 – Годовой ход количества осадков западного склона Хребта Конго-Нила

- Хребет Конго-Нил (высокогорный регион) является самым влажным регионом Бурунди со среднегодовым количеством осадков (норма 1991-2020 гг.) от 1299,4 до 1628,7 мм. В этом регионе воздушные массы совершают орографическое восхождение, что и вызывают обильные осадки. Они становятся более значимыми в сезон дождей, поскольку низкое давление, связанное с ВЗК, приносит сильные дожди. Годовой ход количества осадков на станциях этого региона приведён на рисунке 1.6.

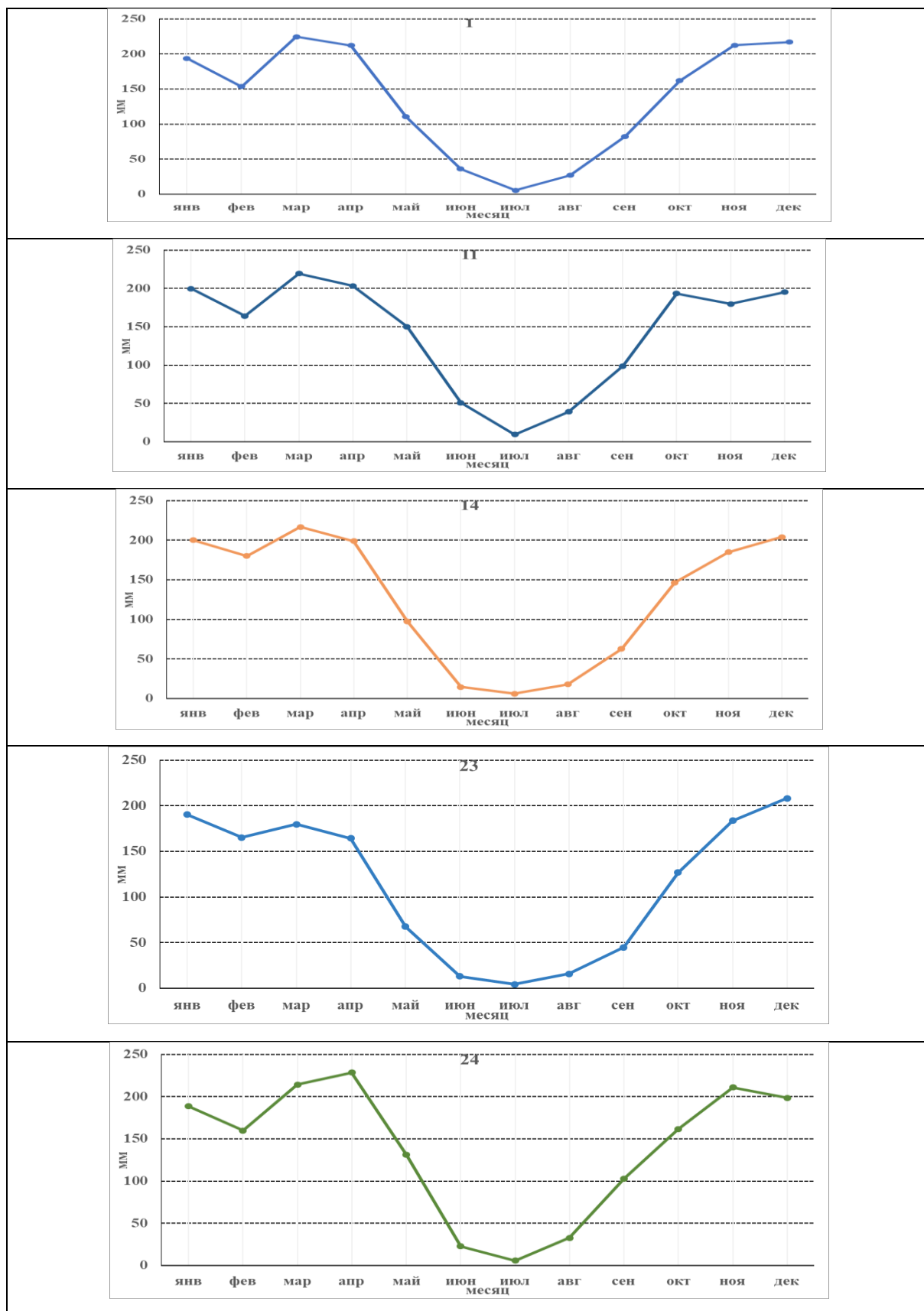


Рисунок 1.6 – Годовой ход количества осадков на станциях Хребта Конго-Нила

- Регион Имбо, узкий пояс равнин на западе страны, высотой от 770 м до 1000 м, с жарким тропическим климатом, характеризуется среднегодовой температурой от 23,3 °С до 24,5 °С; и среднегодовое количество осадков от 768,3 до 1197,9 мм в год и сухим сезоном продолжительностью от пяти до шести месяцев. Занимает 7 процентов территории. Графики годового хода количества осадков этого региона представлены на рисунке 1.7.

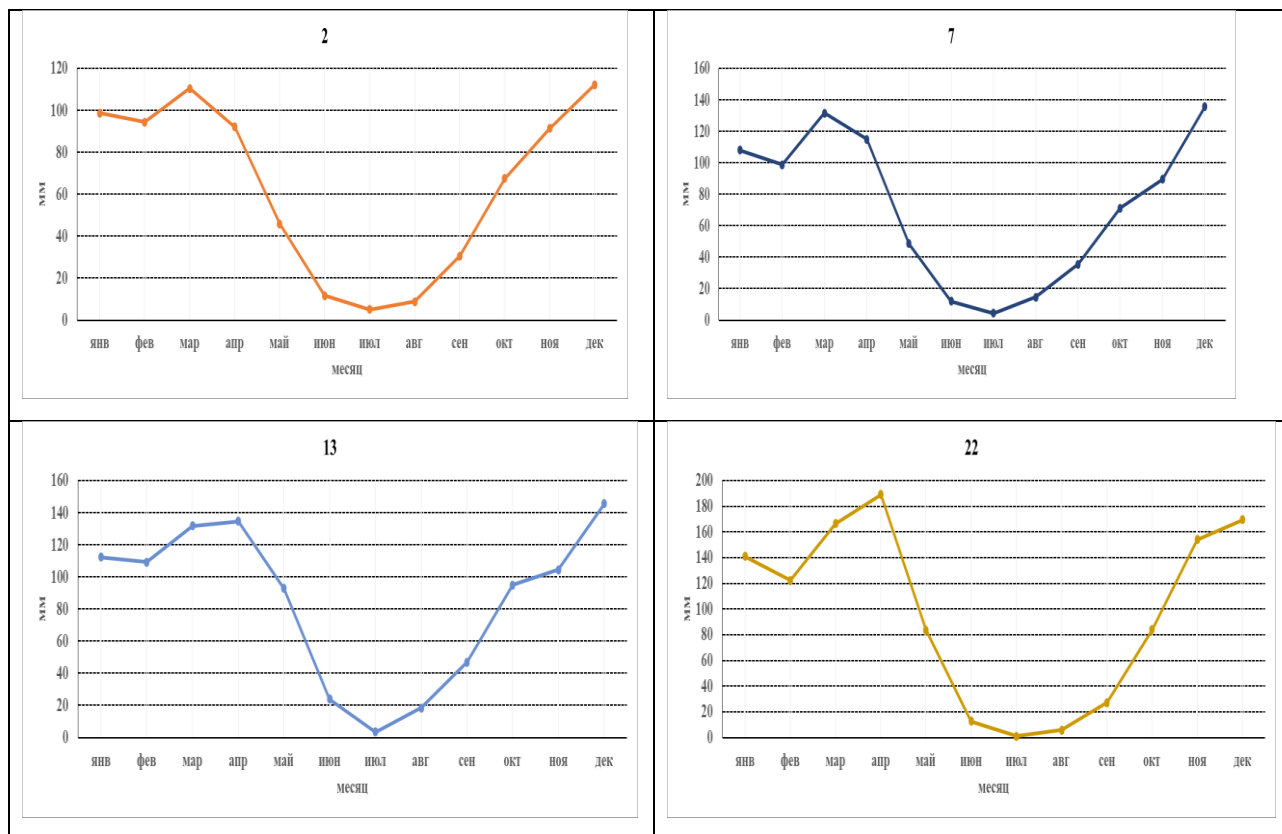


Рисунок 1.7– Годовой ход количества осадков западного района Имбо

- Район крутых склонов Мумирва и Бурагане с высотой от 1100 м до 1700 м, а также впадины Кумосо и Бугесера с высотой от 1100 м до 1400 м, среднегодовой температурой от 17,3 °С до 23 °С и среднегодовым количеством осадков от 1059,7,6 до 1252,4 мм. Годовой ход количества осадков на станциях, расположенных в этом регионе представлен на рисунке 1.8.

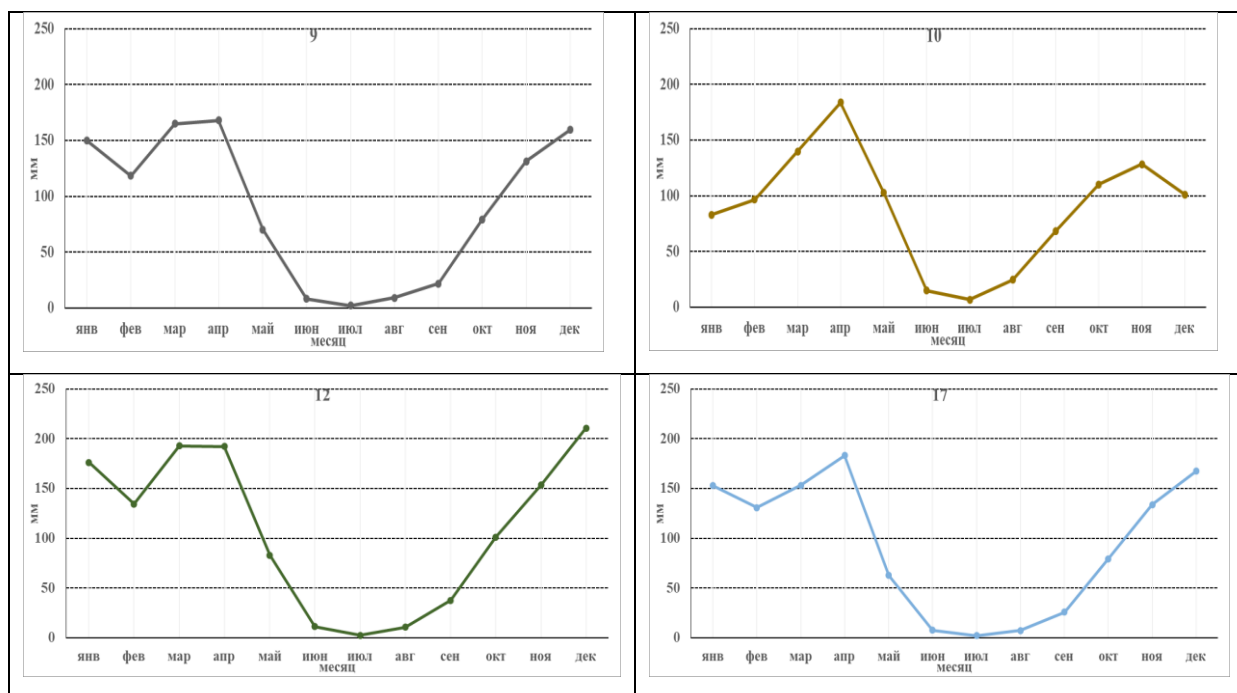


Рисунок 1.8 – Годовой ход количества осадков района крутых склонов
Кумосо

- Центральный район плато с высотой от 1350 до 2000 м, среднегодовая температура от 17,3°C до 22,1°C. и среднегодовое количество осадков от 1101,1 до 1252,4 мм. Занимает 44 процентов территории. Графики годового хода количества осадков на станциях, расположенных в этом регионе представлены на рисунке 1.9.

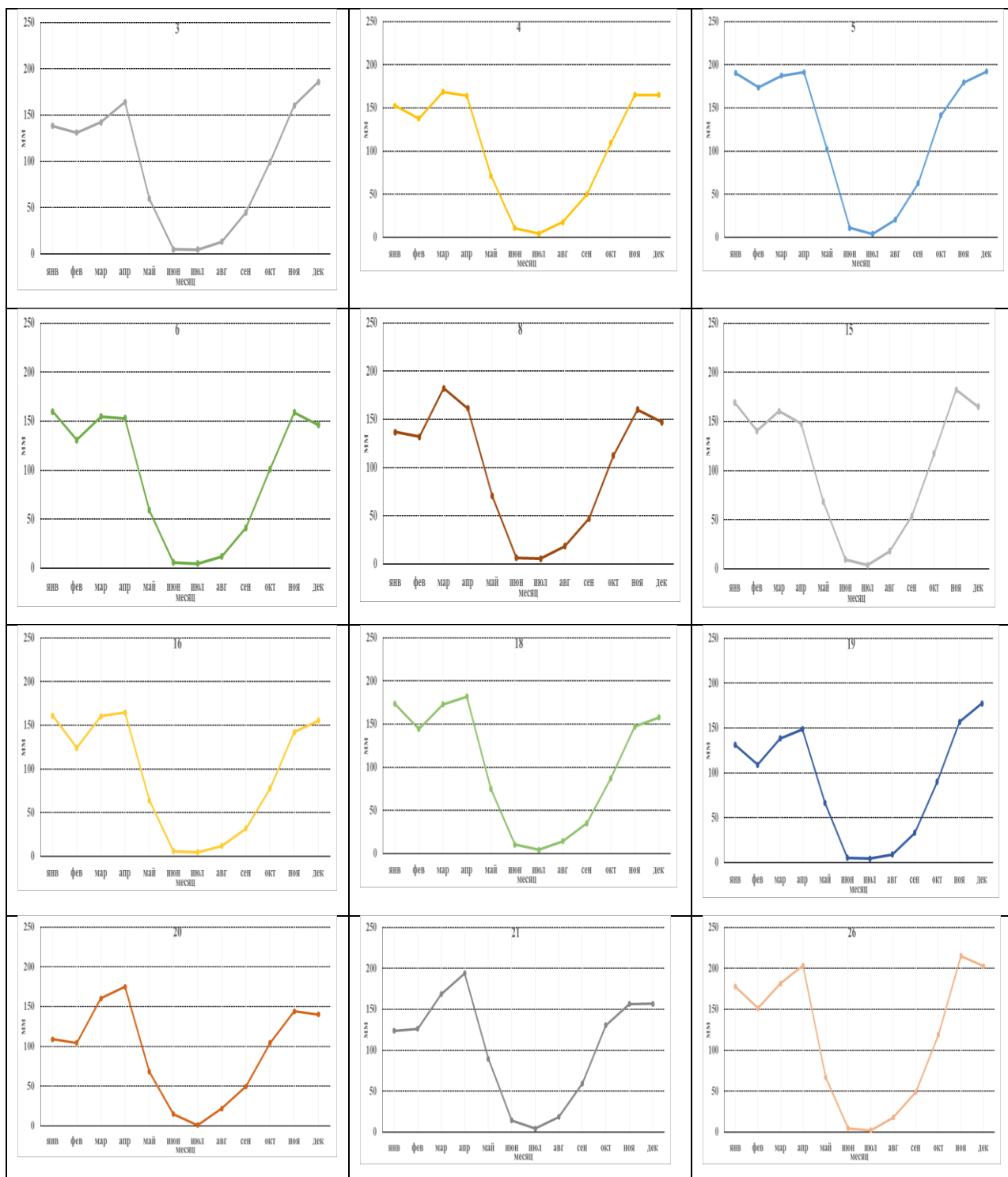


Рисунок 1.9 – Годовой ход количества осадков района центральных плато

Проведя совместный анализ годового хода количества осадков в различных регионах Республики Бурунди (осреднённый график представлен на рисунке 1.10) можно сделать вывод о том, что несмотря на различные местные условия в разных регионах страны (чаще всего наблюдается влияние рельефа) по всей территории сохраняются одинаковые тенденции, а именно:

- В летние месяцы (июнь, июль, август) минимальное количество осадков. В некоторых регионах в июле (самый сухой месяц) осадки отсутствуют.
- В зимние месяцы наблюдается максимальное количество осадков. В большинстве регионов самый «влажный» месяц это декабрь.
- Значительное количество осадков наблюдается и в переходные сезоны. Практически во всех регионах значительное количество осадков выпадает в марте и апреле. В этих регионах именно в это времена выпадает максимальное количество осадков.



Рисунок 1.10 – Годовой ход осадков (климатические среднемесячные за 30 лет 1991-2020)

По количеству осадков можно выделить четыре климатических сезона:

- длинный сезон дождей с сентября по декабрь,
- короткий сезон дождей с марта по май,

- переходный сезон с января по февраль, малое количество осадков по сравнению с сезонами дождей,
- сухой сезон с июня по август дождей мало или совсем нет.

Иллюстрация разделения на сезоны по количеству осадков представлена на рисунке 1.11.

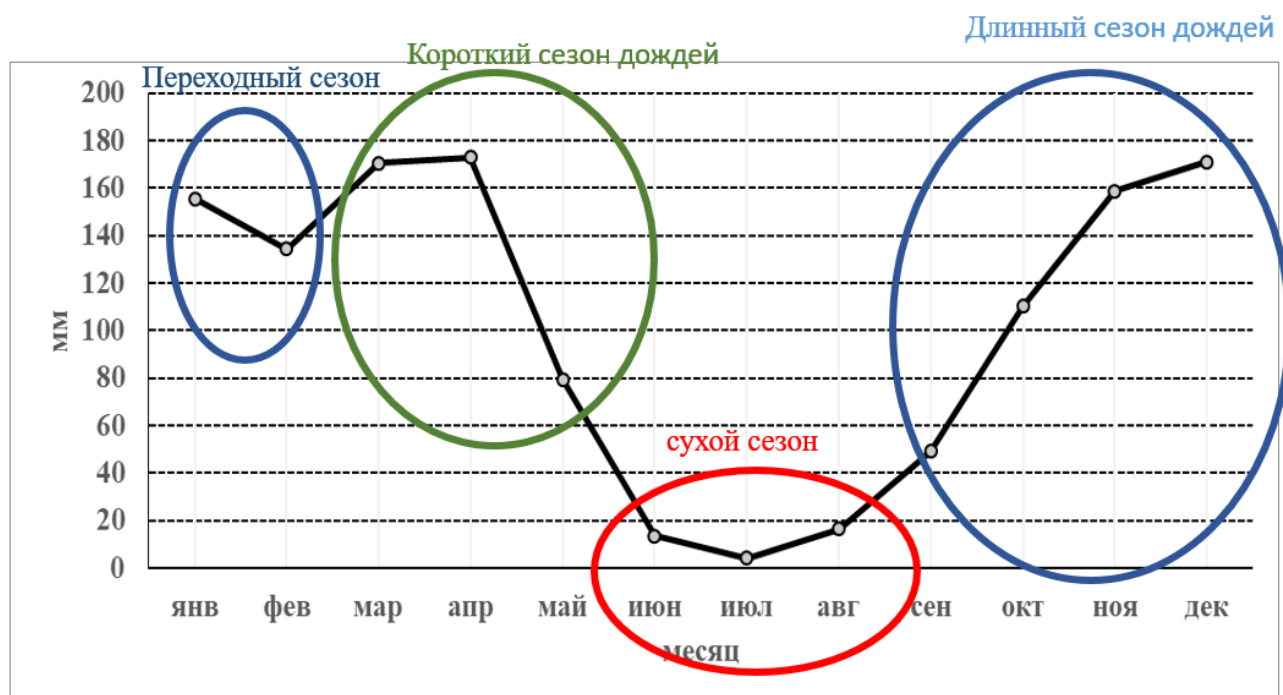


Рисунок 1.11 – Выделение климатических сезонов в Республике Бурунди по количеству осадков

Количество осадков во всех сезонах связано с глобальной циркуляцией, например, с явлением Эль-Ниньо/Южное колебание, внутритропической зоной конвергенции, диполем Индийского океана.

Пространственное распределение осадков по территории Бурунди представлено на рисунке 1.12. Видно, что сохраняется меридиональность в распределении осадков. От засухи (в сухой сезон JJA) страдают в большей степени южные и западные регионы (возможны человеческие жертвы и значительные потери для экономики страны), в то время как в центре и на востоке страны (а также в горном регионе, где находится станция Ruyigi (№ 26)) в длинный сезон дождей (сезон SOND) выпадает очень большое количество

осадков. На количество осадков в сезон дождей значительно влияние оказывает рельеф местности. Экстремальное количество осадков отмечено в горной местности (высота над уровнем моря выше 2000 м).

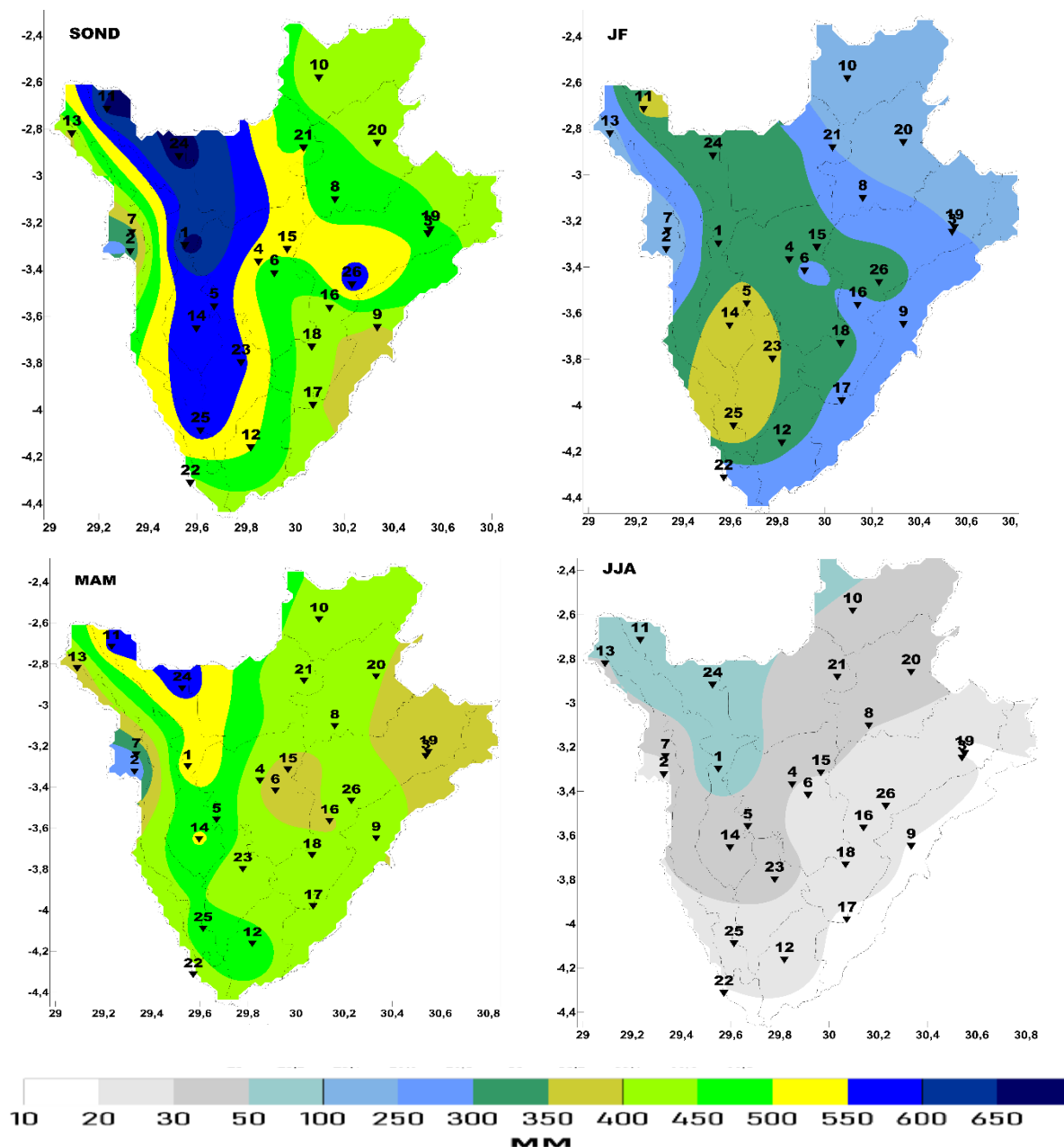


Рисунок 1.12 – Сезонное распределение количества осадков по территории Республики Бурунди

Максимальные осадки наблюдаются на возвышенностях и могут достигать 700 мм за сезон, особенно в годы Эль-Ниньо/Южное колебание.

В связи с описанным режимом осадков в Республике Бурунди отмечают пять типов бедствия, связанных с метеорологическими условиями:

- 1) наводнения,
- 2) засухи,
- 3) град,
- 4) сильный ветер,
- 5) оползни.

Низменности Бурунди могут страдать от наводнений даже при отсутствии осадков, что связано с ливневыми дождями на соседних возвышенностях. Это явление усугубляется вдоль рек.

Основные сельскохозяйственные культуры кукуруза, фасоль, рис, горох, пшеница, кофе, чай и их выращивание соотносится с темя сельскохозяйственными сезонами:

- Первый сезон «агатаси» длится с сентября до середины января и обеспечивает около 37% годового производства.
- Второй, «импеша», длится с февраля по июнь и с ним связано около 46% годового производства.
- Третий, «болотный сезон», длится с июля по октябрь и обеспечивает около 17% годового производства товарными культурами, такими как овощи и картофель.

Первый и второй климатические сезоны соответствуют первому сельскохозяйственному, третий климатический – второму сельскохозяйственному, а четвёртых климатический – третьему сельскохозяйственному. При этом в «болотном сезоне» сельское хозяйство основано на искусственном орошении.

Для оптимального функционирования сельского хозяйства и учёта преимуществ различных климатических сезонов при планировании сельскохозяйственной деятельности необходим прогноз осадков. Причём этот прогноз необходимо разрабатывать на разные сроки – от нескольких часов до месяцев. Для решения этой задачи необходимо разработать объективный подход

к прогнозу осадков, попытка разработки которого и предпринята в данной работе, а именно произведена адаптация мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW к условиям Республики Бурунди

2 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В БУРУНДИ

В настоящий момент для прогноза погоды в Бурунди используют глобальные и региональные модели разных центров моделирования [1,2]. Рассмотрим основные из них.

2.1 Модель Немецкой метеорологической службы (DWD) ICON

DWD – одна из четырнадцати метеорологических служб в мире, использующих уникальную глобальную модель численного прогноза погоды, собственной разработки. Большинство метеорологических служб, использующие собственную модель прогноза, в настоящее время ограничиваются моделями по ограниченной области, фокусируясь на своей конкретной области интереса. Такие модели зависят от боковых граничных условий, предоставляемых глобальной моделью на всем диапазоне их прогноза.

Предшественник модели ICON под названием GME, который начали оперативно использовать в декабре 1999 года, был первой в мире оперативной моделью численного прогноза погоды, использующей икосаэдральную сетку. Эта базовая структура сетки была сохранена и в модели ICON. По сравнению с традиционными подходами, такими как широтно-долготная сетка, икосаэдральная сетка обеспечивает почти однородное покрытие земного шара. Это позволяет избежать, так называемой, проблемы полюсов, связанной со схождением меридианов в широтно-долготной сетки в точках полюса, что создает серьезные проблемы для эффективной вычислительной реализации модели. Генерация сетки начинается с икосаэдра, вписанного в сферу. Соединение 12 вершин икосаэдра геодезическими линиями дает 20 равносторонних сферических треугольников с длиной ребра около 7054 км. Затем итеративное происходит разделение (например, бисекция, трисекция и

т.п.) ребер треугольника, что генерирует сетку модели с желаемым пространственным разрешением. Эффективный размер сетки современной версии модели ICON определяется как квадратный корень из средней площади сферических треугольников, образованных после разделения рёбер. В текущей оперативной версии глобальная сетка модели ICON содержит 2 949 120 треугольников, что соответствует средней площади ячейки (треугольника) 173 км² и, таким образом, эффективному размеру шага сетки около 13 км. Все скалярные прогностические переменные модели (например, температура, плотность, количество влаги) расположены в центре окружности описанной вокруг треугольника, тогда как компоненты ветра, нормальные к краю, расположены в средних точках рёбер треугольников.

2.2 Модель NCEP GFS

Модель GFS (Глобальной системы прогнозирования NCEP) предоставляет результаты анализа и вырабатывает прогноз операционной находятся на глобальной широтно-долготной сетке с шагом 0,25 географических градусов по широте и долготе.

Предоставляются результаты с 3-часовым интервалом при прогнозе с заблаговременностью 0 до 240 часов (10 суток) и 12-часовым интервалом при заблаговременности прогноза от 240 до 384 часов (16 суток). Прогнозы по модели выпускаются (обновляются) в 00, 06, 12 и 18 UTC ежедневно.

2.3 Модель Метеорологического Бюро Великобритании – UKMO

Метеорологическое бюро Великобритании использует унифицированную модель как часть нескольких оперативных систем численного прогнозирования погоды. Глобальные конфигурации Единой модели предоставляют глобальные среднесрочные прогнозы погоды и поддерживают вложенные региональные модели более высокого разрешения с граничными данными. Как

детерминированные, так и ансамблевые глобальные системы численные прогнозы погоды включают интерактивную связь между океаном и атмосферой. Более подробные краткосрочные и среднесрочные прогнозы предоставляются вложенными моделями высокого разрешения, которые могут более точно представлять определенные атмосферные процессы, а также иметь более подробное представление о поверхностных особенностях, таких как береговые линии и топография.

Детерминированный прогноз для Великобритании использует модель переменного разрешения, которая имеет внутреннюю область с высоким разрешением (сетки размером 1,5 км) над Великобританией и Республикой Ирландия, окруженную более грубой сеткой (4 км) внешней области с переходной зоной переменного разрешения между ними.

Ансамбль Великобритании предоставляет информацию о неопределенности прогнозов на срок до пяти дней вперед, используя тот же подход переменного разрешения, но с немного более низким разрешением внутреннего домена. Разброс решения получается путем возмущения как начальных условий, так и некоторых аспектов физических процессов в модели.

2.4 Модель ECMWF

ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды) - одна из двух основных глобальных моделей прогноза погоды в мире, наравне с американской GFS, но первая из них считается самой надежной среди всех моделей.

ECMWF— это европейская глобальная бесшовная модель прогноза. Она широко считается лучшей и самой надежной моделью из существующих в настоящее время.

Она использует концепцию, называемую 4-D, которая представляет собой ассимиляцию, которая позволяет модели постоянно обновляться по мере поступления новых спутниковых или других входных данных.

Модель ECMWF имеет различные разрешения до десятков км.

Заблаговременность прогноза погоды модели ECMWF составляет 10 дней.

Заблаговременность прогноза погоды — это количество часов или дней, на которые делается прогноз. Как правило, чем меньше заблаговременность, тем точнее прогноз.

Временной шаг прогноза ECMWF составляет 3 часа.

Существует два основных типа шага: 1 час и 3 часа.

Частота обновления ECMWF — 2 раза в день. Частота обновления прогноза — это регулярный интервал времени, через который от суперкомпьютеров поступают новые данные прогноза. В целом частота обновления погодных моделей составляет 1, 2 или, скорее, 4 раза в день.

Основные характеристики модели ECMWF:

Тип (территория): глобальный

Пространственное разрешение (сетка): различное (до десятков км)

Заблаговременность (период) прогноза: 10 дней

Шаг прогноза (по времени): 1 час

Частота обновления прогноза: 2 раза в день (каждые 12 часов)

2.5 Система мультимодельного ансамблевого прогноза Mydewetra

Это система прогноза сильных дождей. Она основана на мультимодельном прогнозе погоды с помощью выше рассмотренных моделей. С её помощью можно получить прогноз об основных параметрах состояния атмосферы. Наличие сильных дождей связывается с вероятностью появления осадков в разными градации, что позволяет определить уровень опасности по нормативами правилам ВМО.

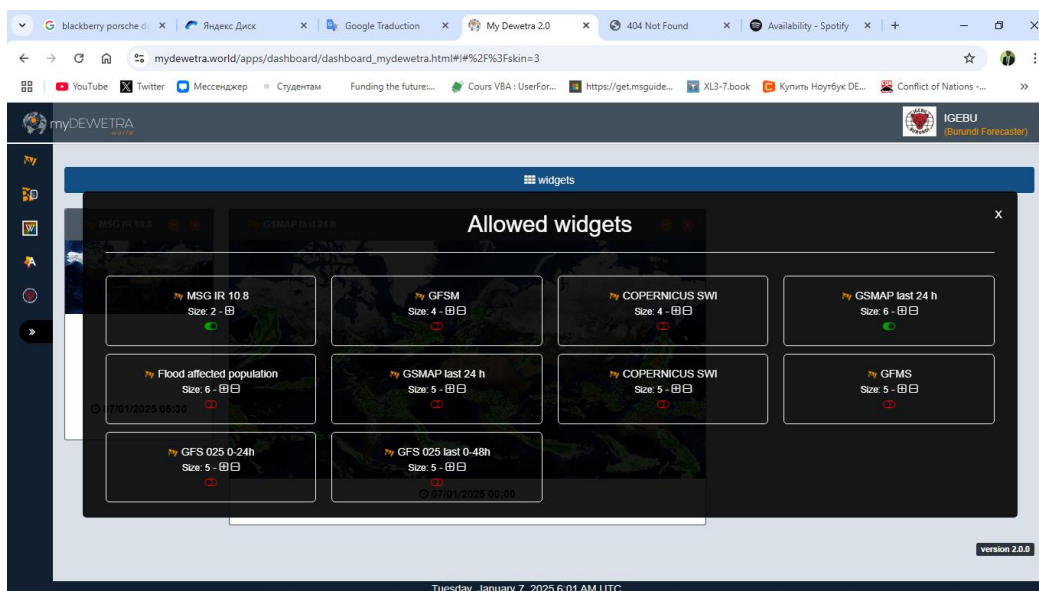


Рисунок 2.1 –Мультимодельная система Mydewetra (Burundi Multimodele)

Система запускается раз в день и разрабатывает прогноз с заблаговременностью 72 часа и дискретностью 6 часов.



Рисунок 2.2 –Интерфейс для запуска системы Mydewetra

После запуска система дает возможности выбрать уровень опасности, время прогноза, параметр и модель, по которой производить прогноза.

Анализируя эти результаты можно составить прогноз погоды на 3 суток. Скриншоты реализации мультимодельной системы ансамблевого прогноза Mydewetra приведена на рисунках 2.3 и 2.4.

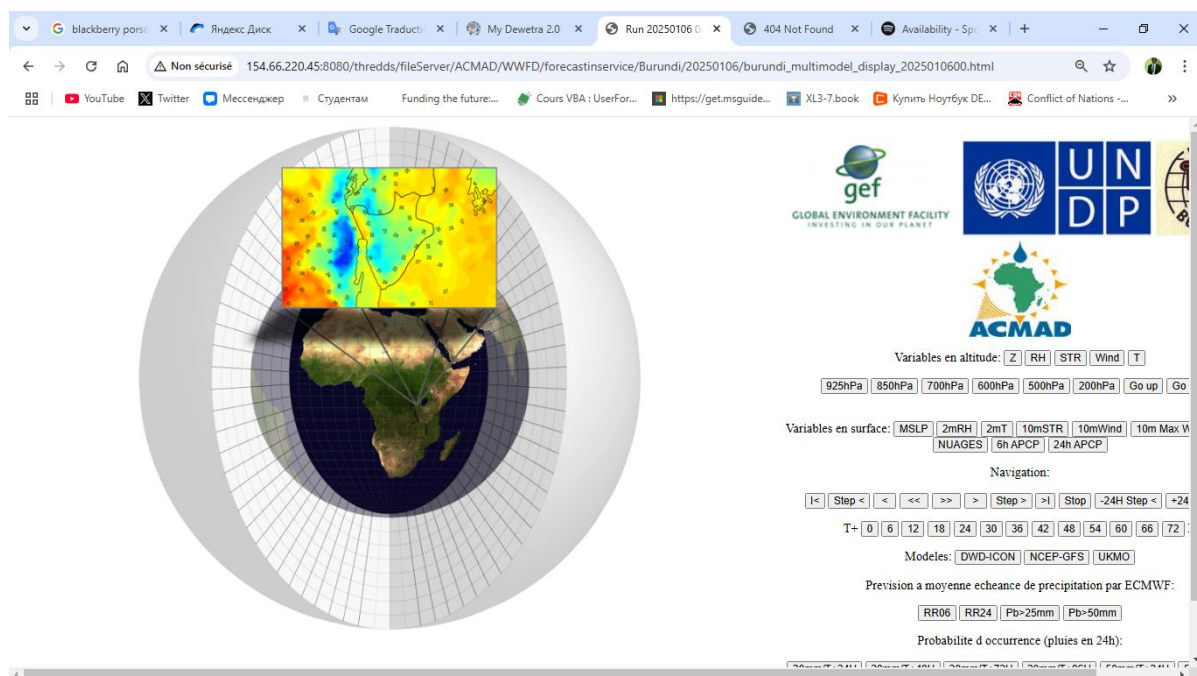


Рисунок 2.3 – Рабочий интерфейс системы Mydewetra

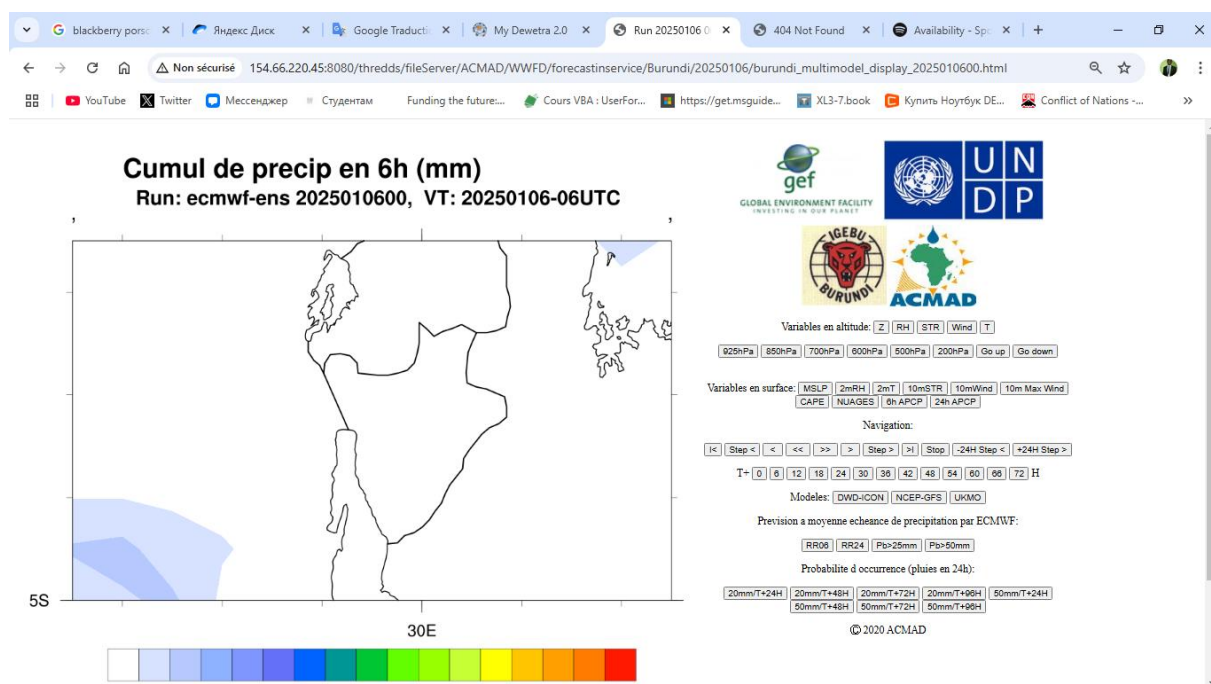


Рисунок 2.4 – Пример результата по модели Ecmwf

Разработанный по результатам моделирования системы Mydewetra прогноз выпускается в виде бюллетеней (рисунок 2.5).

Достоинство система мультимодельного ансамблевого подхода – учёт неопределённостей (ошибок) каждой конкретной модели, возможность определить наиболее вероятное событие (наличие и интенсивность осадков).

Недостаток в том, что система Mydewetra позволяет дать прогноз только по региону, не конкретизируя значения в отдельных пунктах.

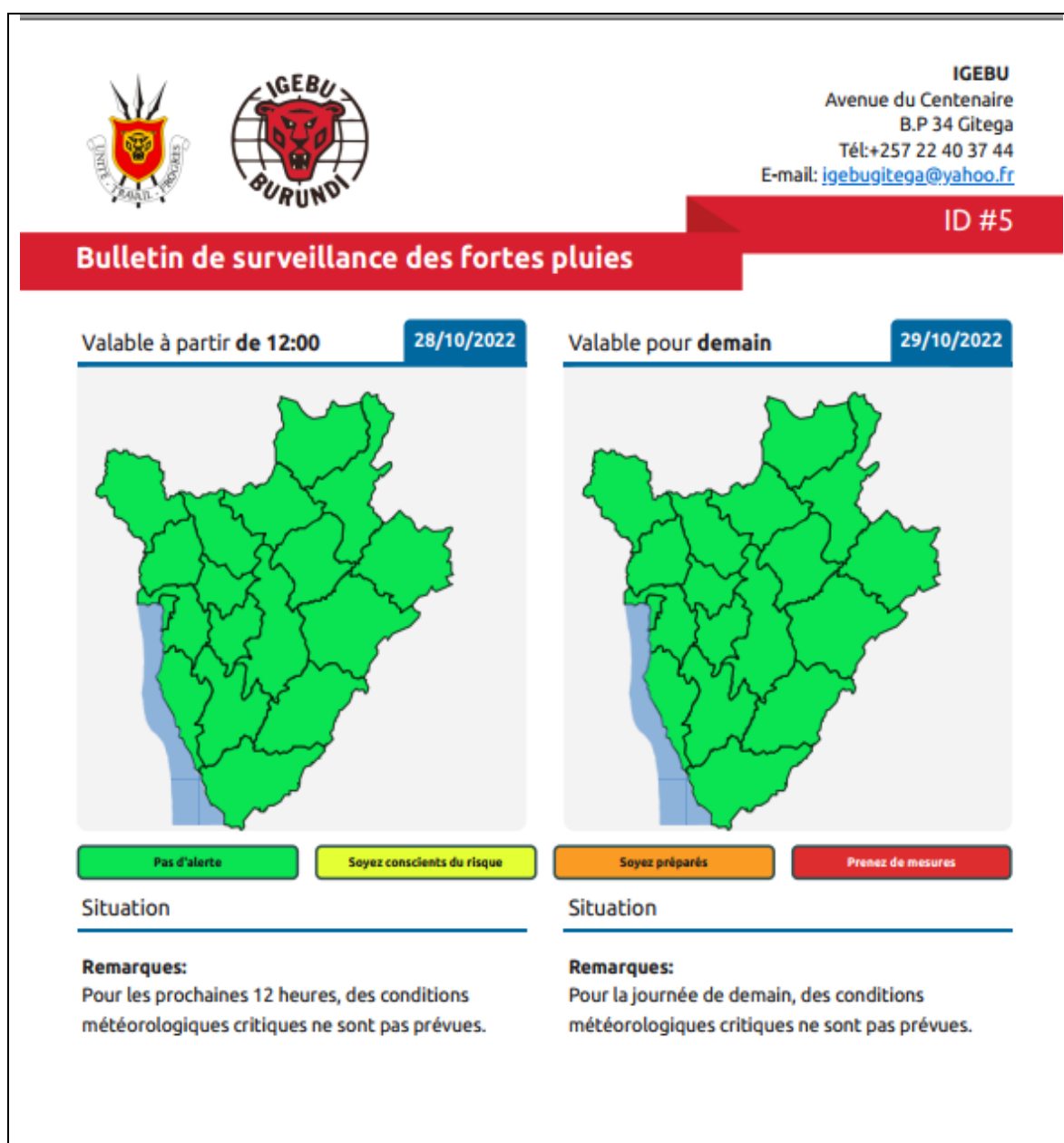


Рисунок 2.5— Пример Бюллетеня прогноза сильных дождей

3. МЕЗОМАСШТАБНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ WRF-ARW

3.1 Описание модели

Расширенная исследовательская система моделирования Advanced Weather Research –Weather Research Forecast (ARW-WRF) находилась в разработке в течение последних нескольких десятилетий. Текущей версией является версия 4.6.2 доступная с апреля 2025 года[4]. Она широко используется как для исследования, так и для оперативного прогнозирования различных погодных характеристик и климатических явлений со значительными последствиями. Решатель ARW модели ARW представляет собой гибкую, современную систему моделирования атмосферы, портативную и эффективную на доступных параллельных вычислительных платформах. Модель WRF-ARW подходит для использования в широком диапазоне приложений в масштабах от метров до тысяч километров, включая:

- Идеализированное моделирование (например, прямое моделирование вихрей (LES), конвекция, бароклинные волны и т.п.),
- Исследования параметризаций.
- Исследования по ассимиляции данных.
- Разработка прогнозов погоды в разных регионах и разной заблаговременности.
- Использование модели в оперативном режиме для прогноза погоды разной заблаговременности.
- Исследования ураганов.
- Региональные климатические исследования.

- Приложения связанных моделированием атмосферы (модель пожаров, гидрологические прогнозы и исследования, модель мегаполиса, полярные исследования, исследование химического состава атмосферы и т.п.).

- Обучение основам гидродинамического моделирования.

Отдел мезомасштабной и микромасштабной метеорологии NCAR в настоящее время поддерживает подмножество общего кода WRF (Версия 3), который включает в себя:

- Программная платформа WRF (WSF)
- Динамический решатель Advanced Research WRF (ARW), включая одностороннюю, двустороннюю раскладку и перемещение раскладки.
- Система предварительной обработки WRF (WPS)
- Система ассимиляции данных WRF (WRF-DA), которая в настоящее время поддерживает 3-DVAR, 4-DVAR и возможности гибридной ассимиляции данных
- Многочисленные физические пакеты, предоставленные партнерами WRF и исследовательским сообществом
- Несколько графических программ и программы конвертации для других графических инструментов

Программные компоненты системы моделирования WRF представлены на схеме рисунка 3.1.

WRF Modeling System Flow Chart

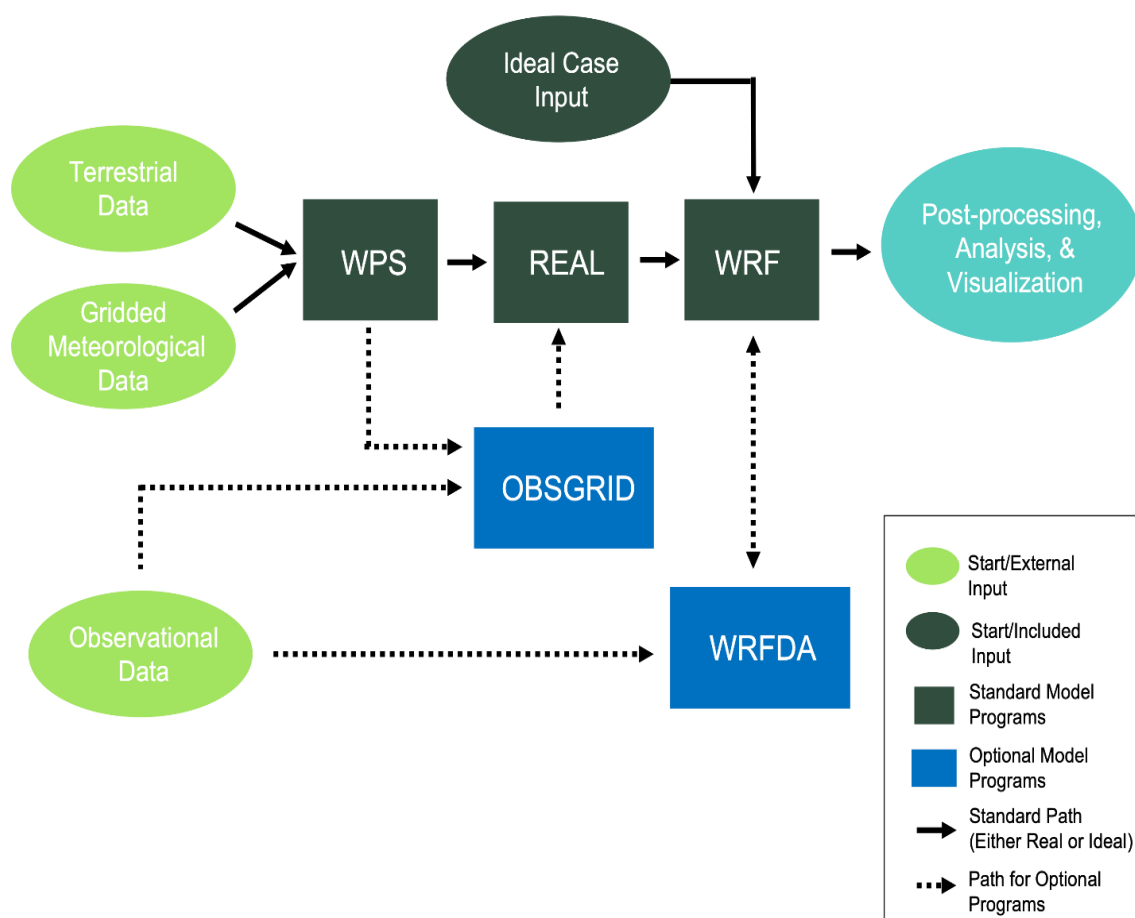


Рисунок 3.1- Схема системы ARW

Как показано на схеме рисунка 3.1, система моделирования WRF состоит из следующих программных блоков.

- Система предварительной обработки – WPS.
- Инициализация данных (реальных REAL и идеальных IDEAL).
- Решатель WRF-ARW (WRF).
- Ассимиляция данных наблюдений (WRFDA).
- Инструменты постобработки, анализа и визуализации.

Программный блок WPS используется в основном при моделировании реальных данных. В его функции входит:

- определение областей моделирования;
- интерполяция наземных статических данных (таких как рельеф, землепользование и характеристики почвы) в область моделирования;

- обработка и интерполяция метеорологических данных, используемых в качестве начальных и граничных условий из результатов глобальной модели (например, модели GFS) в область моделирования.

Основные функции программного блока WPS включают в себя:

- обработка метеорологических данных в форматах GRIB1/2 или netCDF из различных мировых метеорологических центров;
 - наборы статических данных, необходимых для численного моделирования;
 - наземные данные категории USGS 24 и категории MODIS 20;
 - набор данных о высотах поверхности USGS GTOPO30,
 - глобальный набор 5-минутный данных о категориях почвы ФАО ООН и STATSGO;
 - 10-минутные данные о доли растительности на основе данных AVHRR и 30-секундные данные о доли растительности на основе MODIS за 10 лет;
 - индекс листовой площади на основе MODIS;
 - данные об альбедо снега и ежемесячном альбедо на сетке с шагом 0,15 градуса;
 - данные о температуре почвы на глубинах;
 - несколько специализированных наборов данных
- определение картографической проекции и их характеристик. Возможны следующие картографические проекции
 - полярных стереографических,
 - ламберт-конформных,
 - меркаторских
 - широтно-долготных.
- определение вложенных сеток и их характеристик.

Система предварительной обработки данных WPS представляет собой набор из трех программ, коллективная роль которых заключается в подготовке

входных данных для реального моделирования атмосферных процессов. Каждая из программ выполняет один этап подготовки:

- `geogrid.exe` определяет области модели и интерполирует статические географические данные в узлы сетки;
- `ungrib.exe` извлекает метеорологические поля из файлов анализа и прогноза глобальной модели, предоставляемые в модель в формате GRIB1/2 ;
- `metgrid.exe` интерполирует по горизонтали извлеченные на предыдущем этапе (`ungrib`) метеорологические поля на модельные сетки, определенные в `geogrid`. Проводит вертикальную интерполяцию.
- `real.exe` интерполирует метеорологические данные на вертикальные модельные уровни и осуществляет контроль соответствия всех выбранных параметров модели, включая и комбинацию параметризаций.

Модель WRF способна моделировать случаи как реальных, так и идеальных данных.

`ideal.exe` – это часть модели WRF-ARW, которая моделирует работу в контролируемой среде. Идеализированное моделирование инициируется на основе включенного файла начальных условий из существующего зондирования и предполагает упрощенную топографию. В случаях с реальными данными используются выходные данные WPS, которые включают метеорологические данные, первоначально сгенерированные из ранее выполненного внешнего анализа или модели прогноза (например, GFS), в качестве входных данных для программы `real.exe`.

Блок ассимиляции данных – WRF Data Assimilation (WRFDA) — это дополнительная программная единица, используемая для включения наблюдений в интерполированный с сетки глобальной модели анализ, созданный WPS. Ассимиляцию также можно использовать для обновления начальных условий модели WRF, работая в «циклическом» режиме. Основными особенностями WRFDA являются следующие:

- Основан на методе поэтапного вариационного усвоения данных и имеет возможности как 3D-Var, так и 4D-Var.

- Включает возможность гибридного усвоения данных (вариационный + ансамблевый).
- Для минимизации стоимостной функции в пространстве управляющих переменных анализа используется метод сопряженных градиентов.
- Анализ выполняется на нерасштанной сетке А Аракавы.
- Приращения анализа интерполируются в расштанную сетку С Аракавы и добавляются к фону (первое предположение) для получения окончательного анализа на модельной сетке.
- Обычные входные данные наблюдений могут быть предоставлены либо в формате ASCII через утилиту «obsproc» либо в формате «PREPBUFR».
- Входные данные нескольких спутниковых наблюдений могут поступать в формате BUFR.
- Несколько входных радиолокационных данных (отражательная способность и радиальная скорость) подаются в формате ASCII.
- Несколько внешних контуров для устранения нелинейности.
- Возможность вычисления сопряженной чувствительности.
- Горизонтальная составляющая фоновая ошибка (первое предположение) представлена через рекурсивный фильтр (для регионального) или спектр мощности (для глобального). Вертикальный компонент применяется посредством проекций климатологически сгенерированных усредненных собственных векторов и соответствующих им собственных значений
- Горизонтальные и вертикальные фоновые ошибки неразделимы. Каждый собственный вектор имеет свой собственный горизонтальный климатологически определенный масштаб длины
- Предварительное условие фоновой части стоимостной функции выполняется с помощью преобразования управляющей переменной U , определенного как $V = UU^T$

- Включена утилита «gen_be» для получения оценки ковариации климатологической фоновой ошибки с помощью метода NMC или ансамблевых возмущений.
- Вспомогательная программа для обновления файла граничных условий WRF после WRF-DA

Ключевым компонент системы моделирования является динамическое ядро модели ARW Solver, который состоит из нескольких программ инициализации для идеализированного моделирования и моделирования реальных данных, а также программы численного интегрирования. Ключевые особенностями динамического ядра ARW включают в себя:

- Полностью сжимаемые негидростатические уравнения с гидростатической опцией.
- Региональные и глобальные приложения.
- Полный учёт составляющих силы Кориолиса и кривизны Земли.
- Вложенные сетки с возможностью 9 вложений, собственное определения типа взаимодействия сеток (одностороннее или двухстороннее).
- Возможность использовать параллельную телескопизацию — одновременно могут использовать вложенные сетки в разных регионах модельной области. В каждой из вложенных областей может быть до 9 сеток.
- Использование вложенных сеток по вертикали.
- Перемещение вложенных сеток, например, для отслеживания ураганов и смерчей.
- Повторяющая форму рельефа вертикальная координата на основе массы и дополнительная гибридная вертикальная координата (сигма) на основе давления.
- Вертикальный шаг сетки может меняться в зависимости от высоты.
- Масштабные коэффициенты для следующих проекций:
 - полярная стереографическая (конформная),
 - Ламберта-конформная,

- Меркаторская (конформная),
- Широтно-долготная, которую можно вращать.
- Расшатанная сетка С Аракавы.
- Схема Рунге-Кутта для интегрирования по времени, возможен выбор порядка схемы – 2-го или 3-го.
- Потокосая форма уравнений для скалярных переменных.
- Выбор методов описания вертикальной и горизонтальной адвекции – от 2-го до 6-го порядка.
- Монотонный положительно определённых перенос для описания адвекции влаги, скалярных переменных, турбулентной кинетической энергии ТКЕ(ТКЭ)
- Опция использования метода описания конвекции без ложных осцилляций (WENO).
- Небольшой шаг с разделением по времени для акустических и гравитационно-волновых режимов.
- Небольшой шаг, явный по горизонтали, неявный по вертикали.
- Опция демпфирования дивергенции.
- Опция фильтрации внешней моды.
- Верхняя граница поглощения и затухания Рэлея.
- Боковые граничные условия:
 - идеализированные случаи:
 - периодические,
 - симметричные,
 - открытые радиационные;
 - реальные случаи: задаются с зоной релаксации
- Полные физические параметры для земной поверхности и планетарного пограничного слоя.
- Модель океана.

- Сдвиг в сеточном анализе с использованием отдельных аэрологических и приземных данных, а также смещение наблюдений.

- Спектральное смещение.
- Цифровой фильтр при инициализации.
- Адаптивный шаг по времени.
- Описание сопротивления орографической гравитационной волны.
- Стохастические схемы параметризаций.
- Ряд идеализированных примеров.

Графика и инструменты проверки. Поддерживаются нескольких программ, включая

- RIP4 (на основе NCAR Graphics),
- NCAR Graphics Command Language (NCL),
- программы преобразования для других легкодоступных графических пакетов, таких как

- GrADS,
- VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (<http://www.vapor.ucar.edu/>)) – платформа визуализации и анализа для исследователей океана, атмосферы и изучения солнца представляет собой инструмент трехмерной визуализации данных, разработанная и поддерживаемый команда VAPOR в NCAR,
- программа MET (Model Evaluation Tools), разрабатывается и поддерживается Центром испытательных стендов NCAR.

В модели WRF-ARW используются следующие уравнения

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \rho v = 0 \quad (3.1)$$

Уравнения движения

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla(vU) + \frac{\partial p'}{\partial x} = Fu \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(vV) + \frac{\partial p'}{\partial y} = Fv \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla(vW) + \frac{\partial p'}{\partial z} + g\rho' = Fw \quad (3.4)$$

Уравнение притока тепла

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla(v\theta) = F_\theta \quad (3.5)$$

где

$U = \rho u$	компоненты плотности импульса частицы
$V = \rho v$	
$W = \rho w$	
$V = (U, V, W) = (u, v, w) = \rho v$	плотность импульса
$\Theta = \rho \theta$	потенциальная температура
F_U, F_V, F_W, F_Θ	слагаемые, описывающие источники(излучение, процессы подсеточного масштаба, диффузия и радиационные процессы.)

Давление определяется из диагностического уравнения состояния:

$$p = p_0 \left(\frac{R\Theta}{p_0} \right)^\gamma \quad (3.6)$$

Возмущения основных термодинамических переменных представляют собой отклонения от инвариантного по времени гидростатического состояния:

$$p = p_0(z) + p' , \quad (3.7)$$

$$\rho = \rho_0(z) + \rho' , \quad (3.8)$$

$$\Theta = \Theta(z) + \Theta' , \quad (3.9)$$

g – ускорение силы тяжести.

Эти уравнения решаются численными методами.

Модель WRF предлагает большое количество схем параметризации, которые можно совмещать в любом виде.

Модель имеет открытый исходный код и содержит множество схем и аппроксимаций, которые могут быть изменены, позволяя пользователям настраивать модель для определенного региона.

4 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСАДКОВ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ БУРУНДИ

Для достижения цели, поставленной в данном исследовании, был создан домен для территории исследования. Область моделирования представлена на рисунке 4.1. Эта область включает в себе территории Бурунди и некоторых частей граничащих с Республикой Бурунди государств.

Данные для постановки начальных и граничных условия для численных экспериментов были получены по результатам модели GFS, описанной ранее.

Дискретность данных по горизонтали 0.25 градусов

Дискретность смены граничных условий 6 часов.

В данной работе при моделировании и производстве прогноза использовалась гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW версии 4.0.

Для обеспечения точности модели при прогнозировании различных опасных явлений (осадков разной интенсивности на территории Бурунди) используется стандартный набор параметризаций:

- Микрофизика –WRF одномоментная микрофизика 3-го класса ;
- Длинноволновая радиация – схема RRTM ;
- Коротковолновая радиация - схема Дудья ;
- Приземный слой - схема Мони́на-Обухова ;
- Почвенные процессы - схема Noah ;
- Пограничный слой - схема университета Yonsei ;
- Конвекция – схема Кайна-Фритча в 3D.

Основные характеристики модели WRF-ARW, используемые при прогнозе на территории Бурунди:

- Шаг по пространству: $dx = dy = 9\text{ км}$
- Шаг по времени: 60 секунд

- Количество узлов: $169 \times 199 = 33631$
- Количество уровней по вертикале: 24
- Количество уровней по горизонтали: 170 по x, 200 по y
- Количества моментов времени: 8 сроков
- Заблаговременность прогнозов: 72 часов
- Число прогнозов сделанных для марта 2024: 31.

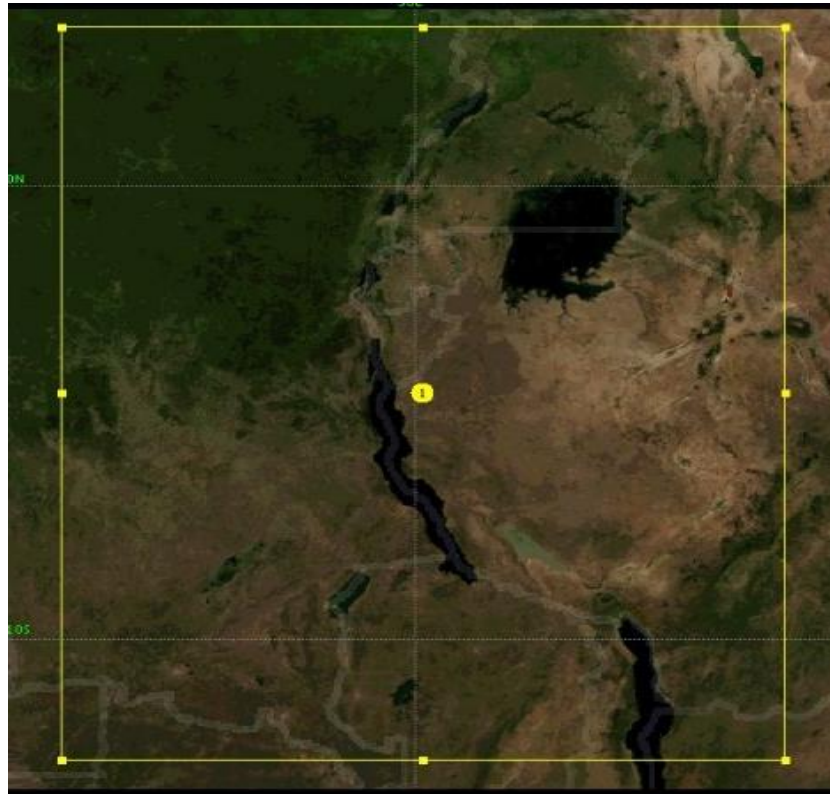


Рисунок 4.1-Область моделирования

Эксперименты проводились для области, включающей Бурунди, между 28° и 30° в.д., 5° и 2° ю.ш. с пространственным разрешением 9 км и с заблаговременностью 24 часа, 48 часов и 72 часа.

Численные эксперименты по прогнозу для территории Бурунди проводились для влажного периода.

Верификация результатов осуществлялась по данным метеорологических станций. Оценивалось качество прогноза количества осадков и проводилась верификация по совпадению местоположения областей осадков.

Численные эксперименты проводились для влажного месяца краткого сезона дождей 2024 года (март) 2024 года.

Разработано 31 прогнозов – с 1 марта 00 UTC на 72 часа до 31 марта.

После успешного выполнения программ динамического ядра формируются выходные файлы, которые были обработаны с помощью написанных на языках программирования fortran и python программ, а также с использованием пакетов Microsoft Excel и OpenGrADS.

В результате этого был осуществлён анализ прогнозов, построены графики и карты сравнения фактических и прогностических данных над Бурунди март 2024г.

Каждый файл результатов содержит данные для 9 моментов времени и анализировались результаты каждые три часа.

Выходные данные модели – это срочные данные каждые три часа. Их обработка позволяет получить суточные суммы осадков, которые можно сравнить с данными на станциях.

Полученные результаты качественно сходятся с климатологией, но с точки зрения оперативной работы надо их сравнить с фактическими данными наблюдения для корректировки и адаптации.

На рисунке 4.2 представлен пример прогностического поля осадков для прогноза от 1 марта 2024 г.

Гидродинамическое моделирование всегда неточно воспроизводит объект моделирования (в нашем случае атмосферу) и именно эти ошибки внося неопределённость в результаты гидродинамического прогноза. Существует классификация присутствующих при моделировании ошибок (неопределённостей) по их источникам.

Источники неопределенностей:

- Ошибки в начальных условиях

Чтобы сделать прогноз, сначала нужно знать текущее состояние атмосферы. Есть много миллионов наблюдений каждый день (особенно сейчас много спутниковых наблюдений), но их недостаточно, чтобы точно определить текущее состояние атмосферы по всему миру и по всей толще атмосферы. Наблюдения никогда не бывают идеальными – в измерениях всегда есть ошибки, связанные с точностью приборов, ошибками передачи информации, точностью перевода результатов измерений из пространства наблюдений в сеточное пространство модели, точности конвертации измеряемых переменных в переменные модели. Наконец, необходимо объединить результаты всех наблюдений из разных источников (с разными ошибками), чтобы создать согласованное представление о трехмерной структуре атмосферы: этот процесс называется ассимиляция данных и он сам по себе может вносить некоторую ошибку. Все эти аспекты означают, что начальные данные для прогноза не идеальны. В нашем исследовании, когда цель – дать прогноз осадков, необходимо отметить, что в стандартной версии модели поля характеристик осадков в начальный момент времени нулевые (осадков нет) и этот может вносить достаточно большие ошибки в результирующие прогностические поля. Следствием отсутствия информации об осадках будет значительный срок эффекта spin-up, то есть подстройки модели под ситуацию, соответствующую начальным условиям, из которых «изъяты» осадки. Также это не позволит дать краткосрочный прогноз осадков. Для борьбы с этой ситуацией в оперативном прогнозе необходимо или осуществлять «горячий старт» модели – непрерывная работа модели, когда каждое прогностическое поле становится начальным полем для следующего прогноза с обязательной ассимиляцией данных наблюдений на метеорологических станциях, радарх, спутниковых данных, или получать начальные поля, в которых есть информация об осадках.

- Ошибки в прогнозировании атмосферного потока (динамики). Численная модель прогнозирования погоды основана на математических уравнениях, которые описывают физические процессы, происходящие в атмосфере. Однако

модель не описывает атмосферу точно – дискретизируют атмосферу (вводят сетку точек, возникают подсеточные процессы), аппроксимируют производные конечно-разностными аналогами, фильтруют и сглаживают поля метеорологических величин, упрощают уравнения гидродинамики атмосферы, выбирая различные упрощающие и фильтрующие гипотезы. Гидродинамическая модель всегда будет обладать этими ошибками, но при современном состоянии гидродинамического моделирования стремятся эти ошибки минимизировать.

- Неадекватность параметризации физических подсеточных процессов. И в сеточных и спектральных подходах к решению уравнений гидродинамики всегда присутствует эффект удаления из решения мелких (по отношению к шагу сетки или волновому числу) процессов и возникает необходимость замыкания системы уравнений. В современных моделях для замыкания используют параметризации физических подсеточных процессов. Основные процессы, которые параметризуются в атмосферных моделях:

- орографические волны,
- распространение радиации коротковолновой и длинноволновой с описанием поглощения, отражения, рассеивания, излучения (для длинноволновой);
- турбулентные потоки (в свободной атмосфере, в пограничном слое атмосферы, в приземном слое);
- диффузия;
- фазовые переходы в атмосфере, включая облако- и осадкообразование и процессы в безоблачной атмосфере;
- конвективные процессы;
- влияние подсеточной орографии;
- микрофизика облаков;
- эффекты урбанизации;
- взаимодействие с подстилающей поверхностью (сушей, океаном, реками, озёрами, болотами).

Количество подсеточных процессов, учитываемых моделями, растёт. Возрастает «физичность» параметризаций. Для описания подсеточных процессов используются современные подходы, например, методы искусственного интеллекта.

Возникает дополнительная проблема, которая называется «серая зона» - ситуация, когда в связи с улучшением разрешения современных моделей, некоторые процессы (например, конвективные процессы) становятся сеточными и должны быть описаны уравнениями модели. Но из-за приближенных методов решения, недостатка данных для постановки начальных условий или даже из-за упрощения уравнений не могут быть описаны явно. И такая ситуация требует дополнительного внимания. Схемы параметризаций, используемые в данной версии модели, описаны выше. Именно с выбора оптимальной комбинации схем параметризаций может начинаться следующий этап разработки системы гидродинамического прогноза осадков для Республики Бурунди.

- Ошибки в граничных условиях

Для прогнозирования погоды также важно представлять взаимодействия между атмосферой в области моделирования и окружающей атмосферой, а также атмосферой и подстилающей поверхностью, модельной атмосферой и вышележащими слоями атмосферы (стратосферой). Для описания этого взаимодействия в современных гидродинамических моделях ставят граничные условия, которые должны обеспечивать достаточно точное описание этого эффекта. Развиваются подходы на основе телескопизации – введения вложенных сеток. По сути, используемая в данном исследовании модельная область, это вложенная сетка в глобальный домен модели GFS. Дальнейшее развитие системы гидродинамического прогноза осадков для Республики Бурунди возможно в добавлении вложенных сеток. При этом несколько вложенных сеток возможны не только с точки зрения детализации прогнозов в одной области, но и в подробном описании отдельно каждого региона, выделенного по климатической регионализации, которая описана в предыдущей главе.

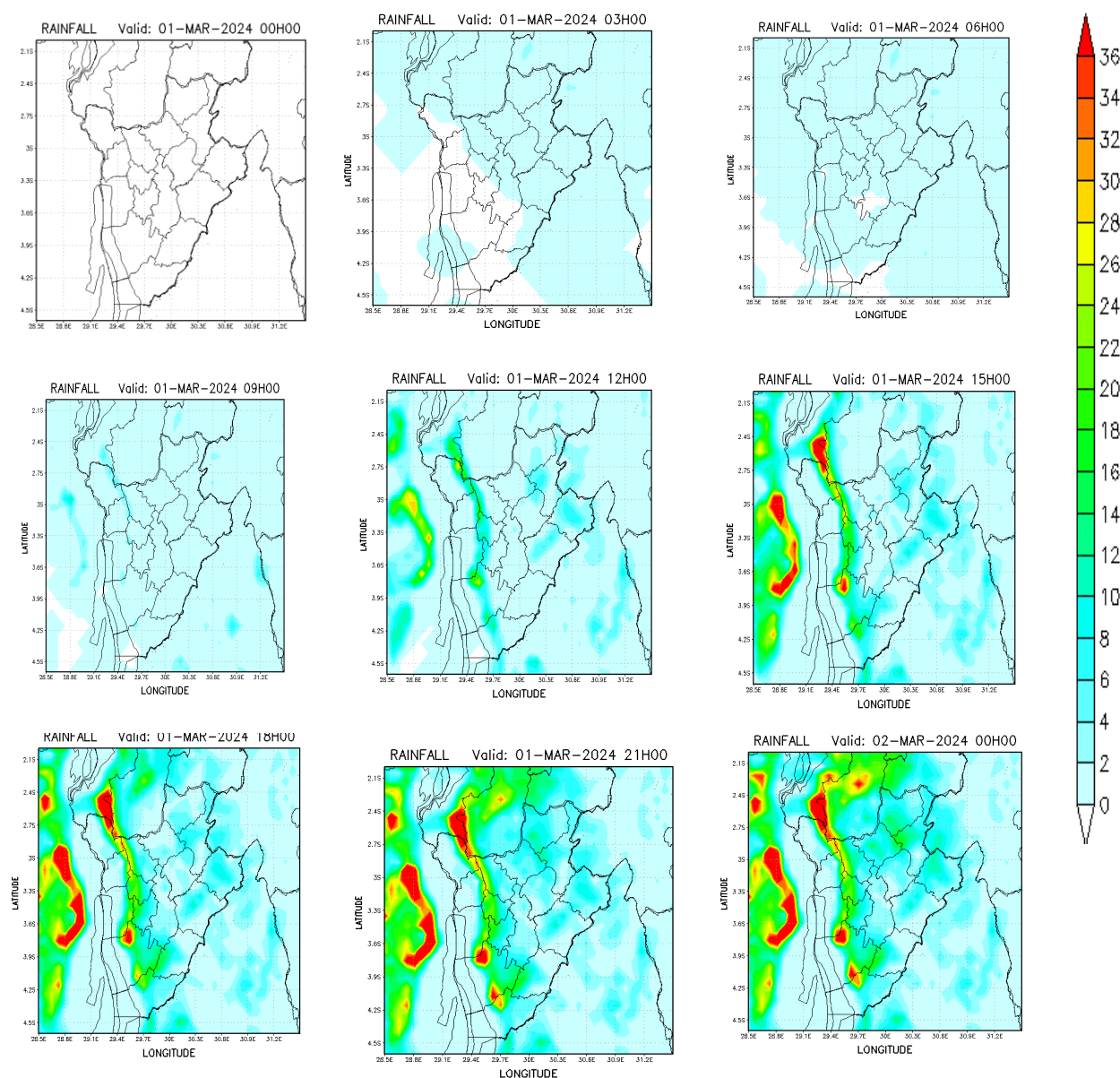


Рисунок 4.2— Пример прогностических полей осадков, 1 марта 2024

На рисунке 4.3 представлен результат прогноза для не марта 2024 года. Анализируя представленное поле, можно сделать вывод о том, что максимальное количество осадков наблюдается именно в том регионе, где согласно проведённому климатическому анализу присутствуют больше всего осадков.

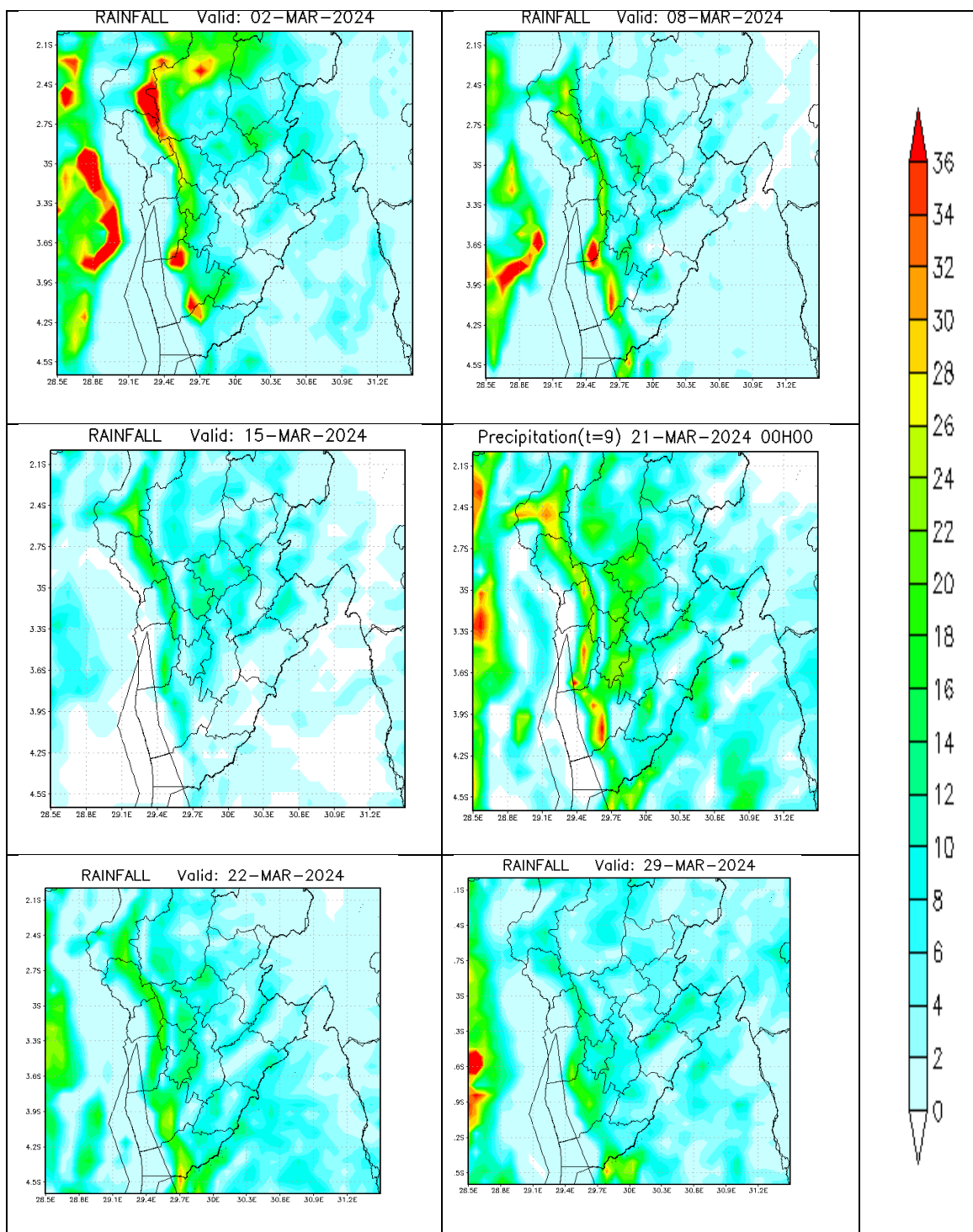


Рисунок 4.3 – Количество осадков 1,7,14,21,22,28 марта 2024 года

Проверка или верификация прогноза – это процесс оценки точности прогнозов, который является важной частью любой научной системы прогнозирования.

Была проведена верификация результатов гидродинамического прогноза осадков, разработанного с использованием модели WRF-ARW, для марта 2024г, а также каждого вида заблаговременности – от 1 до 3 дней.

Для проверки качества прогноза использовался метод построения матрицы сопряженности с учетом критериев и расчёта среднеквадратической ошибки.

Матрица сопряженности показывает частоту присутствия («да») или отсутствия («нет») явления, а также прогнозировалось явление («да») или не прогнозировалось («нет»).

Возможны четыре комбинации прогнозов («да» или «нет») и наблюдений («да» или «нет»), называемые совместным распределением, – это

«да» | «да» (попадание), в данном оценивании – осадки наблюдались и прогнозировались;

«нет» | «да» (пропуск), в данном оценивании – осадки не прогнозировались, но наблюдались;

«да» | «нет» (допущение), в данном оценивании – осадки прогнозировались, но не наблюдались;

«нет» | «нет» (верный отрицательный ответ), в данном оценивании – осадки не прогнозировались и не наблюдались.

На рисунке 4.4 приведён пример матрицы сопряженности для оценки качества прогнозов.

		прогноз		$\sum_{j=1}^2 n_{j0}$
		да	нет	
наблюдение	да	да да n_{11}	нет да n_{12}	n_{10}
	нет	да нет n_{21}	нет нет n_{22}	n_{20}
	$\sum_{i=1}^2 n_{0i}$	n_{01}	n_{02}	N

Рисунок 4.4 – Общий вид матрицы сопряженности для оценки ошибок прогноза осадков.

По матрице сопряженности оценивают следующие критерии:

Индекс точности прогноза (FAI)

Общая оправдываемость прогноза в процентах-это отношение число оправдавшихся прогнозов к общему числу прогнозов. Он варьируется от 0 до 100. Она определяется по формуле:

$$p = \frac{n_{11}+n_{22}}{N} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Частота оценки смещения (BSF –Bias score frequency) – это показатель сходства между наблюдаемым и прогнозом. Соотношение между частотой событий прогноза и наблюдаемой частотой событий известно как частота оценки смещения, и она указывает, склонна ли система прогнозирования занижать прогноз (BIAS<1) или переоценивать прогнозируемые события (BIAS>1). 1 указывает на идеальную оценку. Оценка смещения просто оценивает относительную частоту, а не то, насколько хорошо прогноз соответствует наблюдаемым данным. Он определяется по формуле

$$\text{BIAS} = \frac{n_{01}}{n_{10}} = \frac{n_{11}+n_{21}}{n_{11}+n_{12}} \quad (4.2)$$

4.1.Источник данных для верификации модели

Для проведения верификации был использованы данные наблюдений на 21 метеорологических станциях Республики Бурунди за март 2024г. (таблица 4.1).

Данные представляют суточные данные наблюдения для каждой станции гидрометеорологической сети Бурунди. Заметим, что из всех 26 станции использованных при климатологическом анализе, данных наблюдения существуют только на 21 станции, представленных в таблице 4.1. Станции на которых не было данных наблюдения в момент исследования для периода марта 2024г это станция № 15,16,18,21 и 25.

Таблица 4.1 –Список станции используемых для моделирования

№	Наименование
1	Bugarama
2	Bujumbura
3	Cankuzo
4	Giheta
5	Gisozi
6	Gitega
7	Imbo
8	Karusi
9	Kinyinya
10	Kirundo
11	Mabayi
12	Makamba
13	Mparambo
14	Mpota-Tora
17	Musasa
19	Muyaga
20	Muyinga
22	Nyanza-Lac
23	Ruvyironza
24	Rwegura
26	Ruyigi

На рисунке 4.5 представлен пример суточных сумм осадков для станциях Bugarama(1),Bujumbura(2),Cankuzo(3),Gitega(6),Kirundo(10),Makamba(12). Виден характерный временной ход осадков – сильная изменчивость, что значительно затрудняет прогноз.

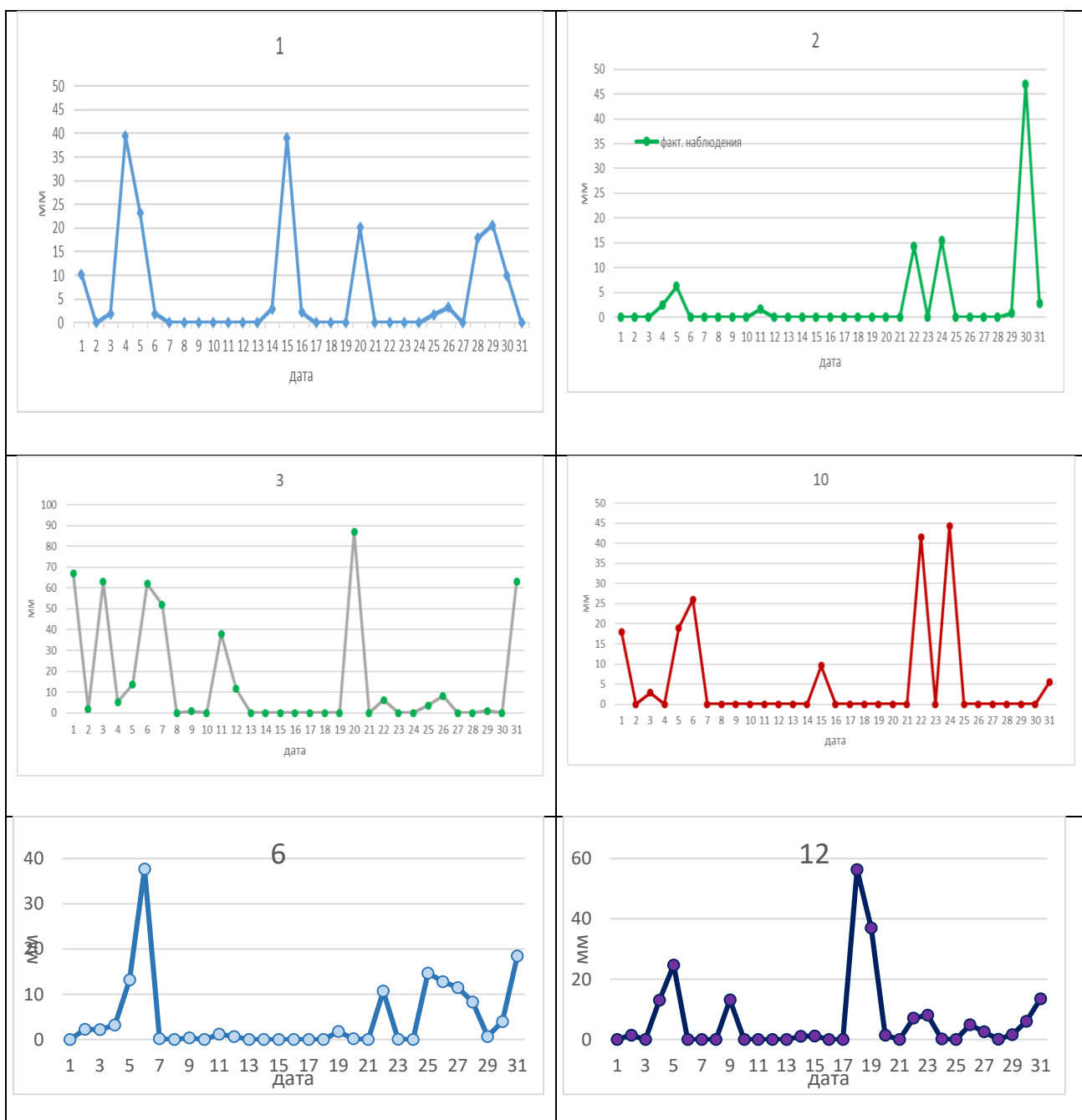


Рисунок 4.5 – Суточные суммы осадков на станциях № 1,2,30,6,10,12 за март 2024г

4.2 Проверка осадков в погодных системах: определение систематических ошибок

Верификация на основе оценки соответствия факта наличия осадков и прогноза осадков, без учёта интенсивности осадков.

Было построена матрица сопряженности «прогноз-факт», где фактическое количество осадков принималось, когда количество осадков превышало 1,0 мм в течение 24-часового периода. Это общепринятый порог Всемирной метеорологической организации (ВМО), используемый для определения дождливого дня.

Матрица сопряженности представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2-Матрица сопряженности

		Прогнозировалось, f _j		
		f – наличие явления	f' – отсутствие явления,	$\sum_{j=1}^2 n_{j0}$
Фактически наблюдалось	о – явление наблюдалось	n ₁₁	n ₁₂	n ₁₀ =n ₁₁ +n ₁₂
	о' – явление не наблюдалось	n ₂₁	n ₂₂	n ₂₀ =n ₂₁ +n ₂₂
	$\sum_{i=1}^2 n_{0i}$	n ₀₁	n ₀₂	N=n ₁₁ +n ₁₂ +n ₂₁ +n ₂₂

Общая оправдываемость прогноза осадков в процентах определяется по формуле(4.3):

$$p = \frac{n_{11}+n_{22}}{n_{11}+n_{12}+n_{21}+n_{22}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Общая доля прогнозируемых осадков, которые не наблюдались в процентах (ошибка допущения) определяется по формуле:

$$p(f/o') = \frac{n_{21}}{N} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Общая доля не прогнозируемых осадков, но которые наблюдались в процентах (ошибка пропуска) определяется по формуле:

$$p(f'/o) = \frac{n_{12}}{N} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Матрица сопряженности при разной заблаговременности прогнозов представлена на рисунке 4.6.

24ч				48ч			
	f	f'			f	f'	
о	1	5	6	о	2	3	5
о'	0	21	21	о'	5	17	22
	1	26	27		7	20	27
72ч				ИТОГО			
	f	f'			f	f'	
о	4	2	6	о	7	10	17
о'	5	16	21	о'	10	54	64
	9	18	27		17	64	81

Рисунок 4.6 – Матрица сопряженности прогноз-факт для прогноза осадков разной заблаговременности

Зелёным цветом в матрице сопряженности выделены оправдавшиеся прогнозы.

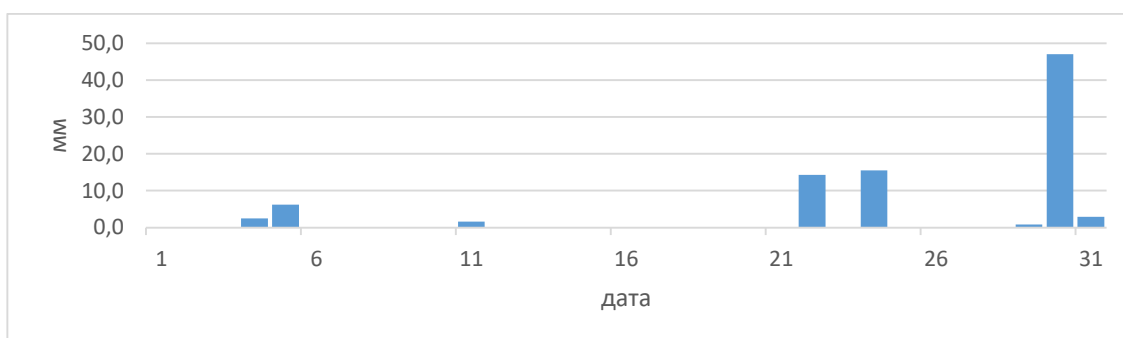
Первичный (визуальный) анализ матрицы сопряженности позволяет говорить о неплохом соответствии – прогноз-факт.

На рисунке 4.7 представлены графики фактических и прогностических осадков для станции Бужумбура с разной заблаговременности – 23, 72 и 72 часа.

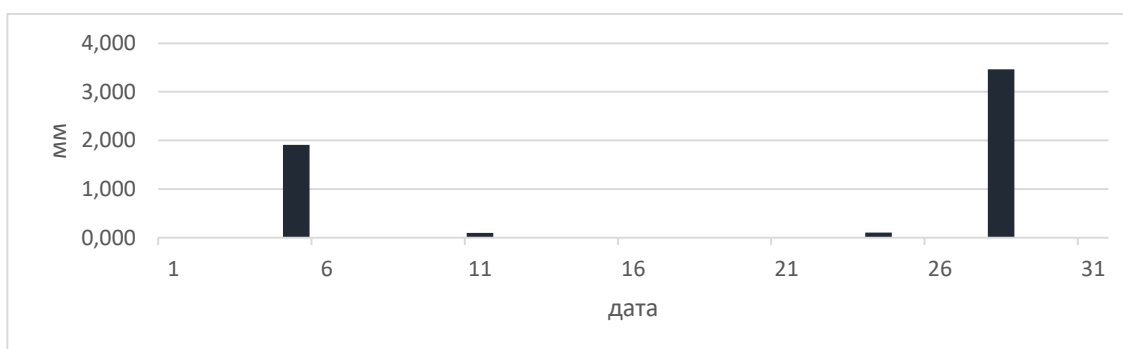
Были спрогнозированы при всех сроках прогноза осадки 5 марта и 29 марта, но пропущены осадки 15 марта.

И для всех заблаговременностей прогноза неправильно спрогнозировано количество осадков.

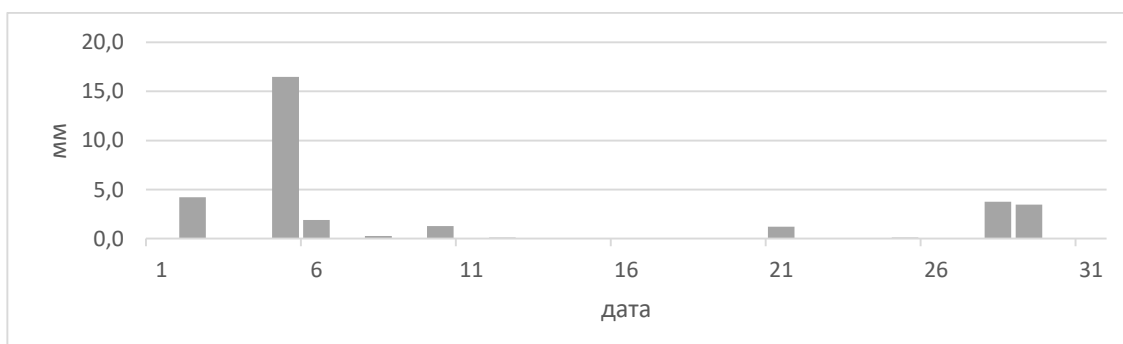
В таблице 4.3 представлены критерии оценивания качества прогноза.



Наблюдаемые осадки



Прогноз на 24ч



Прогноз на 48ч

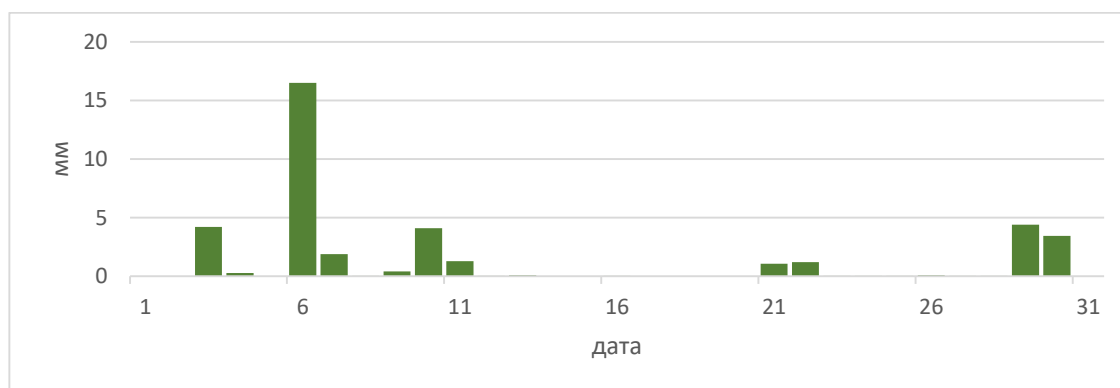


Рисунок 4.7 – Наблюдаемые и прогнозируемые осадков на станции Бужумбура

Таблица 4.3-Критерии оценки оправдываемости прогноза на всех 21 станции, %

	24Ч			48Ч			72Ч		
	p	p(f/o')	p(f'/o)	p	p(f/o')	p(f'/o)	p	p(f/o')	p(f'/o)
Bugarama	48,1	51,9	0,0	40,7	55,6	3,7	43,2	55,6	1,2
Bujumbura	81,5	0,0	18,5	70,4	18,5	11,1	75,3	12,3	12,3
Cankuzo	51,9	22,2	25,9	55,6	37,0	7,4	49,4	39,5	11,1
Giheta	33,3	63,0	3,7	30,8	61,5	7,7	35,5	60,7	3,8
Gisozi	48,1	51,9	0,0	33,3	63,0	3,7	40,7	58,0	1,2
Gitega	51,9	48,1	0,0	40,7	55,6	3,7	45,7	53,1	1,2
Imbo	70,4	0,0	29,6	70,4	11,1	18,5	69,1	8,6	22,2
Karusi	59,3	40,7	0,0	44,4	55,6	0,0	44,4	55,6	0,0
Kinyinya	74,1	18,5	7,4	51,9	44,4	3,7	59,3	37,0	3,7
Kirundo	22,2	74,1	3,7	29,6	70,4	0,0	25,9	72,8	1,2
Mabayi	53,8	46,2	0,0	51,9	48,1	0,0	50,0	50,0	0,0
Makamba	48,1	33,3	18,5	48,1	48,1	3,7	48,1	44,4	7,4
Mparambo	59,3	18,5	22,2	48,1	48,1	3,7	48,1	42,0	9,9
Mpota-Tora	40,7	59,3	0,0	37,0	59,3	3,7	40,7	58,0	1,2
Musasa	48,1	51,9	0,0	25,9	74,1	0,0	34,6	65,4	0,0

	24Ч			48Ч			72Ч		
	p	p(f/o')	p(f'/o)	p	p(f/o')	p(f'/o)	p	p(f/o')	p(f'/o)
Muyaga	55,6	37,0	7,4	44,4	55,6	0,0	42,0	55,6	2,5
Muyinga	51,9	44,4	3,7	40,7	55,6	3,7	43,2	54,3	2,5
Nyanza-Lac	44,4	0,0	55,6	55,6	14,8	29,6	59,3	8,6	32,1
Ruvyironza	63,0	37,0	0,0	48,1	48,1	3,7	53,1	45,7	1,2
Ruyigi	44,4	29,6	25,9	37,0	59,3	3,7	42,0	48,1	9,9
Rwegura	81,5	18,5	0,0	59,3	37,0	3,7	66,7	32,1	1,2
Итого	53,9	35,5	10,6	45,9	48,6	5,5	48,4	45,6	6,0

Из таблицы сразу заметим, что из 21 станции оправдываемость ниже 50% показали:

9 станций при прогнозе на 24 часа,

14 станции при прогнозе на 48 часов,

15 станций при прогнозе на 72 часа.

Был рассчитан показатель схождения прогноза и фактических наблюдений по всей станциям и показали, что модель в большей степени завышает количества осадков (рисунок 4.8).

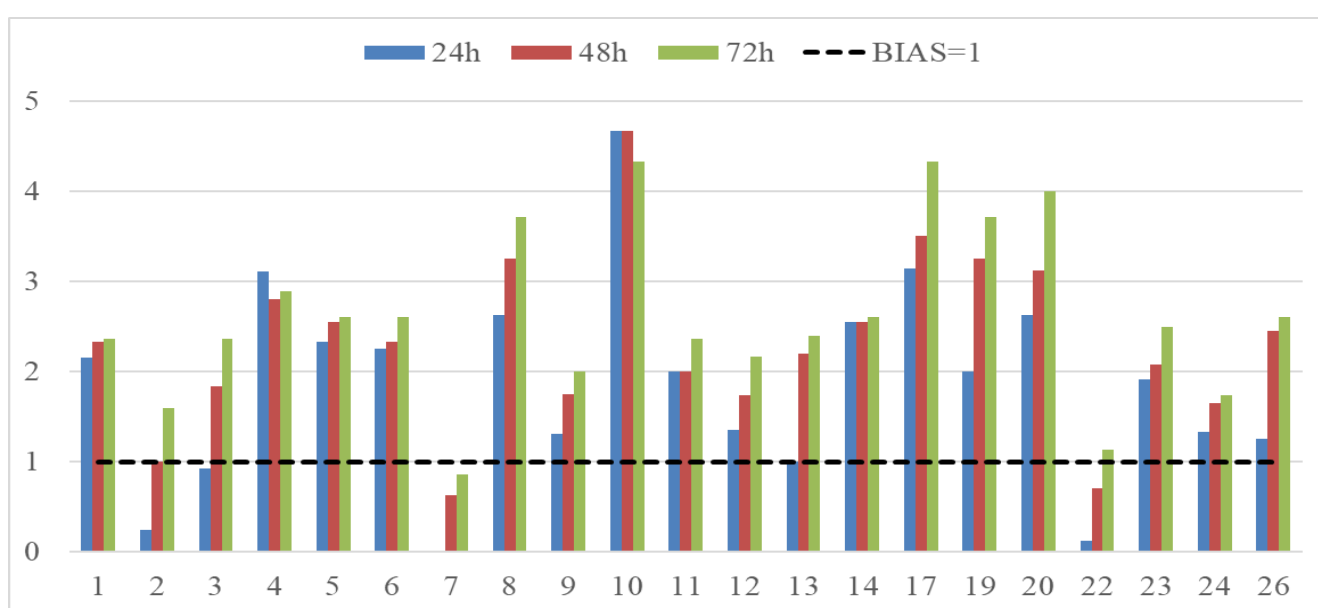


Рисунок 4.8 – Показатель схождения прогноза и фактического наблюдения

4.3 Оценка качества прогноза осадков по градациям их интенсивности

Прогноз наличия дождя или его отсутствия оценивается только по соответствии двух ситуаций – есть/нет осадки и есть/нет их наличие в прогнозе.

Есть и необходимость в прогнозе количества осадков. Для верификации прогноза с этой точки зрения строят матрицу сопряженности с числом возможных классов больше 2; например, в случае прогноза осадков можно определить больше классов осадков разной интенсивности.

Показатель эффективности можно легко обобщить на случай таблицы сопряженности с n случаями или классами явлений. Причем для лучшей количественной оценки качества прогнозов используется оценка явления определенной градации путем построения матрицы сопряженности следующих видов (таблица 4.4).

Таблица 4.4-Оценка прогноза на 24ч

А) Матрица сопряженности при критерии 0 - 1мм

	станция		f_1	f_0	Σ	p
1	Bugarama	o_1	0	16	16	45%
		o_0	0	13	13	
			0	29	29	
2	Bujumbura	o_1	24	0	24	90%
		o_0	3	2	5	
			27	2	29	

Б) многокритерная матрица сопряженности

ст.Bugarama		Прогноз,мм				
		[0-1]	[0-10]	[10-50]	[50-80]	Σ
Набл	[0-1]	0	6	10	0	16
	[0-10]	0	0	5	1	6

	[10-50]	0	0	7	0	7
	[50-80]	0	0	0	0	0
	Σ	0	6	22	1	29
ст.Вujumbura		Прогноз,мм				
		[0-1]	[0-10]	[10-50]	[50-80]	Σ
Наблюдения,мм	[0-1]	24	0	0	0	24
	[0-10]	2	2	0	0	4
	[10-50]	1	0	0	0	1
	[50-80]	0	0	0	0	0
	Σ	27	2	0	0	29

Из этих матриц можно рассчитать показатель точности прогноза явления связанных с осадками.Один из них это индекс точности прогноза рассчитан по формуле

$$\sum_{i=j}^k n_{ij} \quad (4.6)$$

где

i , j=1,2,.....k ;

k – число классов, здесь k=4

Результаты расчета такого показателя приведены на рисунке 4.9

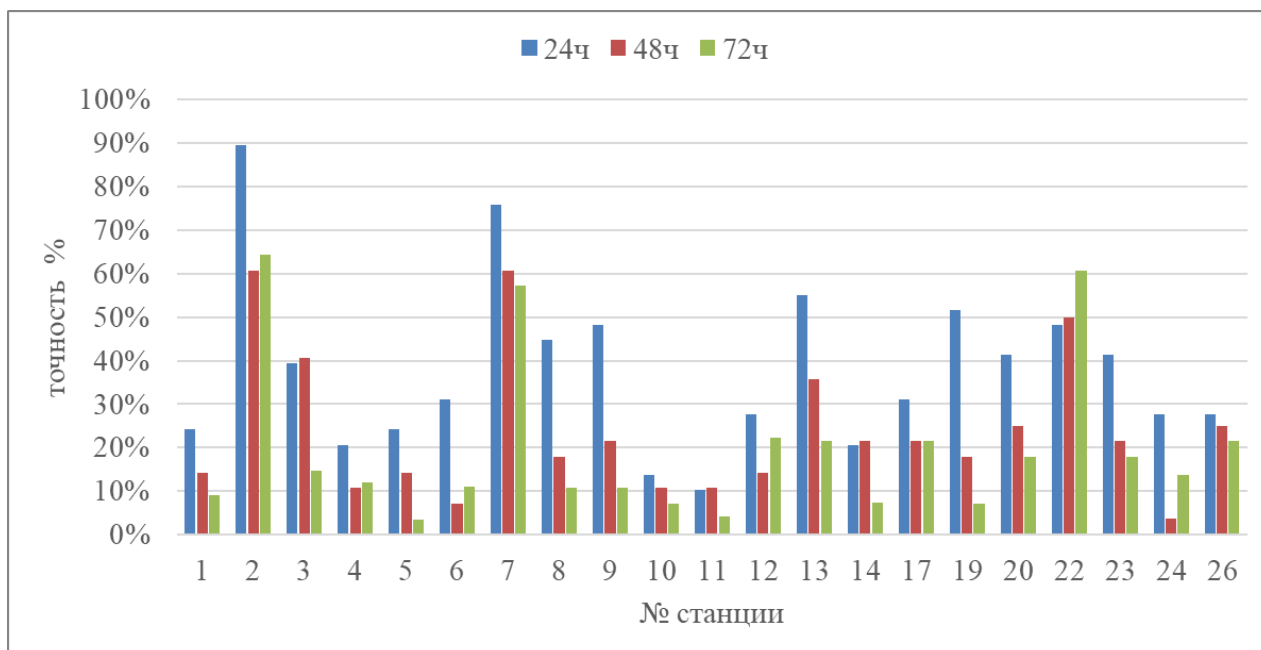


Рисунок 4.9 – Точность прогноза осадков

Анализы обеих матриц показывают, что на станции Бужумбура хорошо прогнозируют наличие/отсутствие осадков интенсивностью меньше 1мм причем общая оправдываемость составляет 90%.

Критерии оценки ошибки прогноза:

[6,7]

$$\text{Среднеквадратическая ошибка } MSE_{total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2 \quad (4.7)$$

Где f_i , o_i -прогноз и наблюдение N-количество точек(узел сетки)

$$RMSE = \sqrt{MSE_{total}} \quad (4.8)$$

Таблица 4.5 средняя квадратная ошибка для двух станции

№	станция	24ч	48ч	72ч
1	Bugarama	19,00	38,85	62,57
2	Bujumbura	2,83	10,00	9,57

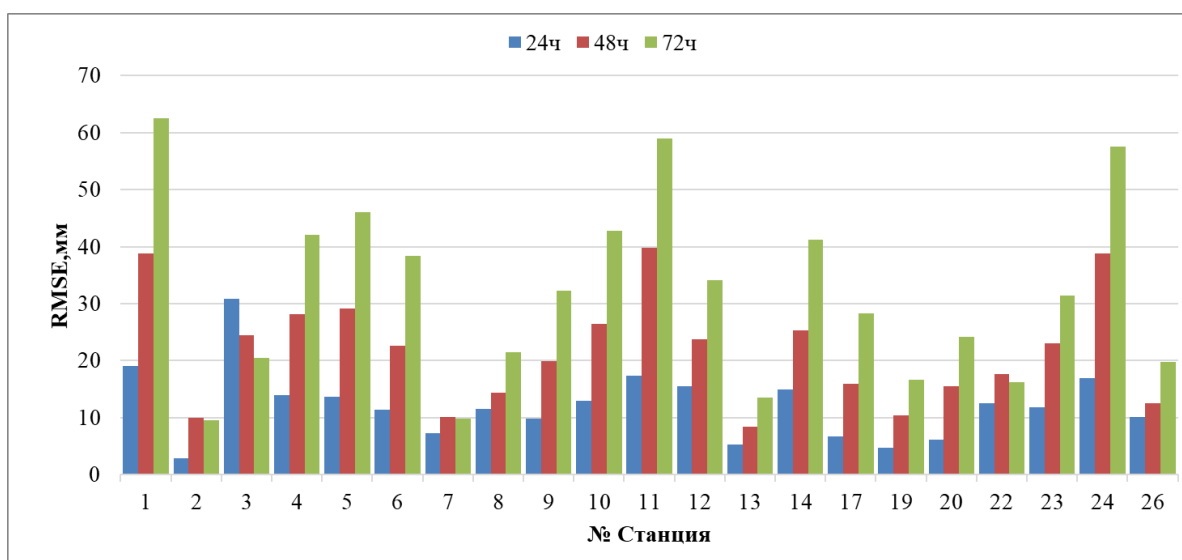


Рисунок 4.10- Среднеквадратная ошибка прогноза (мм)

Ошибка прогноза осадков растёт с увеличением периода заблаговременности.

Полная таблица ошибок представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Среднеквадратические ошибки прогноза осадков (в мм) для территории Бурунди в марте 2024г по модели

№	станция	24ч	48ч	72ч
1	Bugarama	19,00	38,85	62,57
2	Bujumbura	2,83	10,00	9,57
3	Cankuzo	30,81	24,40	20,47
4	Giheta	13,97	28,11	42,01
5	Gisozi	13,61	29,18	46,11
6	Gitega	11,42	22,62	38,44
7	Imbo	7,28	10,07	9,89
8	Karusi	11,49	14,41	21,42
9	Kinyinya	9,80	19,95	32,23
10	Kirundo	12,97	26,38	42,84
11	Mabayi	17,37	39,78	58,97
12	Makamba	15,44	23,72	34,17
13	Mparambo	5,32	8,46	13,51
14	Mpota-Tora	14,98	25,26	41,21
17	Musasa	6,63	15,92	28,35
19	Muyaga	4,77	10,40	16,61
20	Muyinga	6,12	15,45	24,21
22	Nyanza-Lac	12,56	17,61	16,16
23	Ruvyironza	11,84	22,99	31,46
24	Rwegura	16,88	38,86	57,51
26	Ruyigi	10,16	12,55	19,80

Рекомендуется, чтобы Национальные гидрометеорологические службы работали со своими Управлениями по гражданской обороне для определения того, каким образом вероятность возникновения ожидаемого опасного явления и его потенциальная суровость могут учитываться в их прогнозах (ансамблях) для создания матрицы риска.

На рисунке 4.10 показано предлагаемое оперативное применение концепции предупреждения о последствиях, сочетающей последствие с вероятностью возникновения для создания «матрицы риска», при этом риск показан посредством простой схемы цветов «светофора». Напоминаем в данном случае, что понятие «последствие» включает оценку уязвимости и подверженности.[8]

В отличие от традиционной системы метеорологических предупреждений, основанной на пороговых значениях или на «да/нет», этот подход обеспечивает следующее:

1. Соответствующее средство для раннего сообщения о потенциальном последствии, при этом с большой заблаговременностью до наступления значительного гидрометеорологического явления.

2. Средство для поэтапного сообщения о сменяющихся предположениях в отношении риска как функцию изменяющейся вероятности подверженности, уязвимости и гидрометеорологического явления.

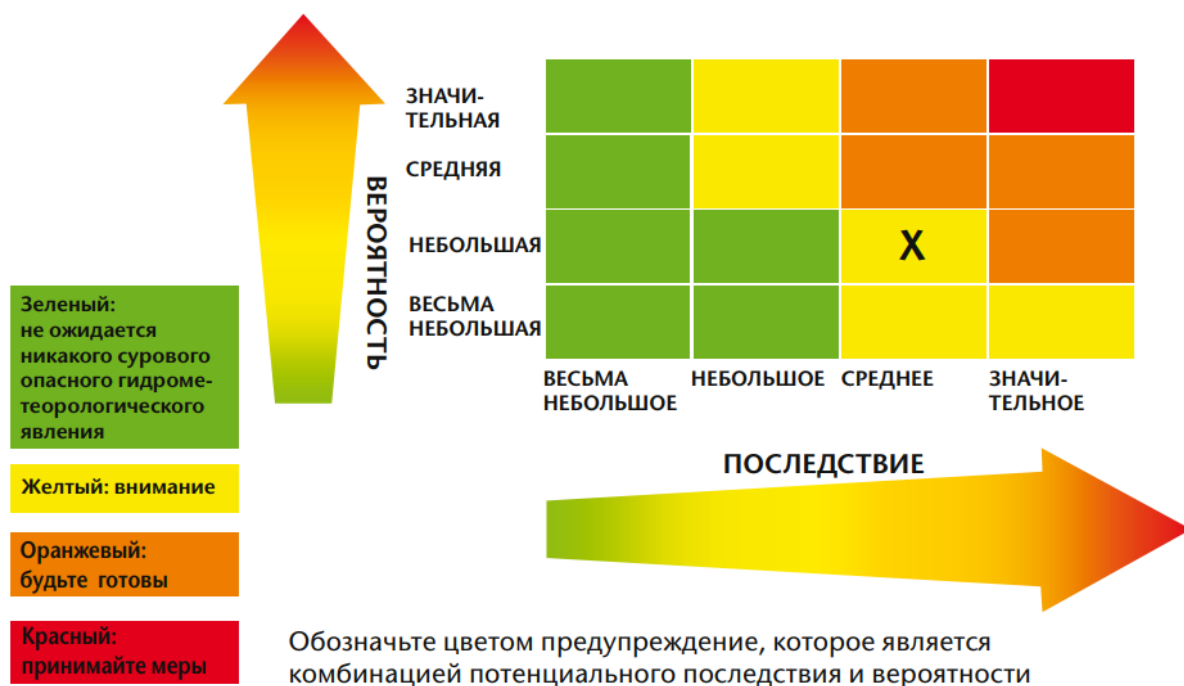


Рисунок 4.10 – пример Матрицы Риска

4.3 Методика оперативного прогноза осадков

В ходе работы была разработана методика для гидродинамического прогноза количества осадков для территории Бурунди с использованием модели ARW-WRF.

- 1) Ежедневно в 7:00 получать данные глобального моделирования. Возможные варианты – модель GFS (свободный доступ) или заключение соглашения с другими центрами и получение данных с лучшим разрешением.
- 2) Повторения каждые 6 часов
 - i. Ассимиляция данных наблюдений
 - ii. Запуск модели на 72 часа.
 - iii. Обработка результатов и разработка информации для потребителей.

iv. Верификация результатов с последующим анализом и уточнением модельных установок.

3) Один раз в неделю запуск модели на 30 суток для составления климатического прогноза

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Количество осадков в Бурунди имеют долготное распределение. Однако существование климатических сезонов показывает, что больше времени года территории получают достаточные осадки, исключительные два сухих месяца, т.е. Июль и Август.

Из-за того, что экономика зависит от сельскохозяйственного производства, то прогноз осадков оказывается очень важным. Он нужен и для управления и службы для катастроф. Эти информации помогают принять нужное решение в нужное время. Модель хорошо прогнозирует факт наличия/отсутствия осадков. Области прогнозных и фактических осадков совпадают. Интенсивность осадков прогнозируется с ошибкой. Требуется дополнительное исследование. Данное исследование показало возможности применения модели для прогноза наличия или отсутствия осадков для территории Бурунди. Неравномерное распределение осадков и топографии осадков показывает отличие результатов модели по региону.

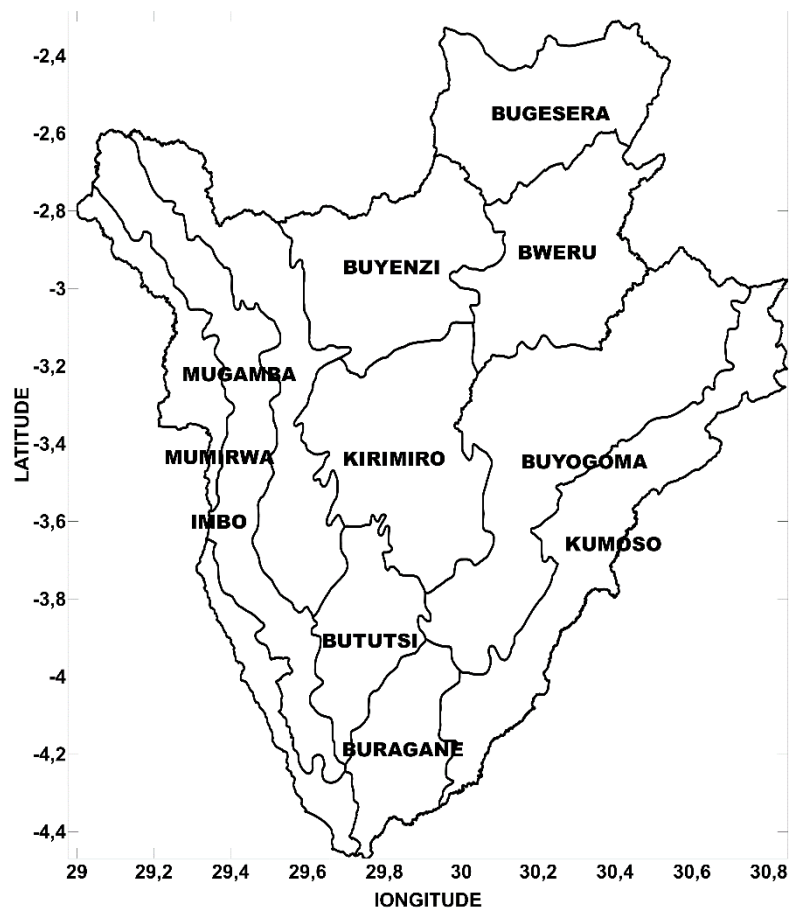
В дальнейшей работе нужно исследовать особенность каждого региона при моделировании в разных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВКР(Магистерская диссертация) Гидрометеорологический прогноз осадков для Буруни,Нзамбимана Энок,РГГМУ 2022
2. ВКР(Магистерская диссертация) Гидрометеорологический прогноз погоды для Буруни,Ндикумана Элиас,РГГМУ 2021
3. Développement d'un Modèle Simplifié de Prédiction des Précipitations au Burundi,НАKIZIMANA Jean Claude ,Bénin,Université Abomey-Calavi,2023
4. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 4 (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.4/users_guide_chap1.html) [доступ : 04.12.2024г]
5. Etude sur la recherche et observation systématique du climat,NTIBWUNGUKA Sylvestre,IGEBU 2019
6. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors Elizabeth Ebert,John McBride
7. Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part I: Methodology and Application to Mesoscale Rain Areas Christopher Davis,Barbara Brown
8. Руководящие указания ВМО по обслуживанию прогнозами и предупреждениями о многих опасных явлениях с учетом их возможных последствий ВМО № 1150,2015 г

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Карта природных регионов Бурунди



Приложение Б Административная Карта Бурунди

Carte administrative du Burundi

(Nouveau redécoupage administratif de Mars 2023)



Приложение В Таблица квадратных ошибок прогноза осадков (в мм) для территории Бурунди в марте 2024г по модели

№	станция	24ч	48ч	72ч
1	Bugarama	19,00	38,85	62,57
2	Bujumbura	2,83	10,00	9,57
3	Cankuzo	30,81	24,40	20,47
4	Giheta	13,97	28,11	42,01
5	Gisozi	13,61	29,18	46,11
6	Gitega	11,42	22,62	38,44
7	Imbo	7,28	10,07	9,89
8	Karusi	11,49	14,41	21,42
9	Kinyinya	9,80	19,95	32,23
10	Kirundo	12,97	26,38	42,84
11	Mabayi	17,37	39,78	58,97
12	Makamba	15,44	23,72	34,17
13	Mparambo	5,32	8,46	13,51
14	Mpota-Tora	14,98	25,26	41,21
17	Musasa	6,63	15,92	28,35
19	Muyaga	4,77	10,40	16,61
20	Muyinga	6,12	15,45	24,21
22	Nyanza-Lac	12,56	17,61	16,16
23	Ruvyironza	11,84	22,99	31,46
24	Rwegura	16,88	38,86	57,51
26	Ruyigi	10,16	12,55	19,80

Приложение Г Исходный код для визуализации данных на GrADS

```
1  function main(args)
2  arg0=subwrd(args,1)
3  arg1=subwrd(args,2)
4  say 'arg0='arg0
5  file=arg0
6  'reinit'
7  'set display color white'
8  'open 'file'.ctl'
9  'set lon 28.5 31.5'
10 'set lat -4.6 -2'
11 tt=9
12 while(tt<30)
13 'set t 'tt
14 'set grads off'
15 'set gxout shaded'
16 'color -gxout shaded 0 36 2 -kind white->aqua->lime->yellow->red'
17 'q time'
18 time=subwrd(result,3)
19 timeGOD=substr(time,9,4)
20 timeMON=substr(time,6,3)
21 timeDAY=substr(time,4,2)
22 timeHOUR=substr(time,1,2)
23 'draw xlab LONGITUDE'
24 'draw ylab LATITUDE \\'
25 'd rainc+rainsh+rainnc'
26 'draw shp ESA_admin1_region'
27 'draw title RAINFALL Valid: 'timeDAY'-'timeMON'-'timeGOD
28 'printim picture/rainfall_daily'timeDAY'.png white'
29 'c'
30 tt=tt+8
31 endwhile
```

Приложение Д. Исходный код для расчёта показателя матрицы сопряженности на .Python

```
1  import pandas as pd
2  import logging
3  pd.options.display.max_rows=100
4  t1=[i for i in range(1,30)]
5  df=pd.read_excel("work_data.xlsx",sheet_name="obs",engine="openpyxl")
6  df24=pd.read_excel("work_data.xlsx",sheet_name="72h",engine="openpyxl")
7  xyz=df[["Station_Name"]+t1]
8  xyz24=df24[["72H"]+t1]
9  def check_forecasts(xyz,xyz24,st):
10     z1=xyz.where(xyz['Station_Name']==st).dropna(how='all')
11     z2=xyz24.where(xyz24['72H']==st).dropna(how='all')
12     z1.fillna(-999,inplace=True)
13     z2.fillna(-999,inplace=True)
14     n11,n12,n21,n22=0,0,0,0
15     l0,l1=0.0,1.0
16     rme=0 #
17     for k in t1:
18         v1=(z1[k].values[0]) #фактические наблюдения
19         v2=(z2[k].values[0]) #модельные прогнозы
20         if(v2==-999 or v1==-999):
21             pass
22         elif (v2>=l1):
23             if(v1>=l1 ):
24                 n11+=1
25                 rme=rme+(v1-v2)**2
26             else:
27                 n21+=1
28                 rme=rme+(v1-v2)**2
29         else:
30             if(v2==-999 or v1==-999):
31                 pass
32             elif(v1>=l1):
33                 n12+=1
34                 rme=rme+(v1-v2)**2
35             else:
36                 n22+=1
```

```

36         n22+=1
37         rme=rme+(v1-v2)**2
38     return(n11,n12,n21,n22,rme/sum([n11,n12,n21,n22]))
39
40 #Создание и настрйка logger - файл для отслеживания процессов
41 logging.basicConfig(filename="f000.log",format='%(asctime)s % (message)s',filemode='w')
42
43 #Создание объекта
44 logger = logging.getLogger()
45
46 #Установить значения logger на DEBUG
47 logger.setLevel(logging.DEBUG)
48
49 results=pd.DataFrame({"Station":[],"f1":[],"f0":[],"Σ":[]})
50 for d in df['Station_Name']:
51     try:
52         n=check_forecasts(xyz,xyz24,st=d)
53         new_row1 = pd.DataFrame({"Station":[d],"f1":[n[0]],"f0":[n[1]],"Σ":[n[0]+n[1]]})
54         new_row2 = pd.DataFrame({"Station":[""],"f1":[n[2]],"f0":[n[3]],"Σ":[n[2]+n[3]]})
55         new_row3 = pd.DataFrame({"Station":[""],"f1":[n[0]+n[2]],"f0":[n[1]+n[3]],"Σ":[n[0]+n[1]+n[2]+n[3]]})
56         results= pd.concat([results,new_row1,new_row2,new_row3], ignore_index=True)
57     except:
58         print(f'No data found for : {d}')
59
60 #запись результатов в файл
61 with pd.ExcelWriter("grad5.xlsx",if_sheet_exists="overlay",mode="a",engine="openpyxl") as writer:
62     results.to_excel(writer,sheet_name="yes_no-72H")
63
64 def check_4casts(xyz,xyz24,st):
65     z1=xyz.where(xyz['Station_Name']==st).dropna(how='all')
66     z2=xyz24.where(xyz24['72H']==st).dropna(how='all')
67     z1.fillna(-999,inplace=True)
68     z2.fillna(-999,inplace=True)
69     n1=n2=n3=n4=n5=[0,0,0,0]

```

```

68     z2.fillna(-999,inplace=True)
69     n1=n2=n3=n4=n5=[0,0,0,0]
70     l=(0.0,1.0,10.0,50.0,80.0)
71     for k in t1:
72         if (len(z1[k])>0 and len(z2[k])>0):
73             v1=(z1[k].values[0]) #observations=наблюдения
74             v2=(z2[k].values[0]) #forecasts=прогнозы
75             for i in range(len(l)-1):
76                 if(v2!=-999 or v1!=-999):
77                     pass
78                 elif (v2>=l[i] and v2<l[i+1]):
79                     if(v1>=l[0] and v1<l[1]):
80                         n1[i]+=1
81                     elif(v1>=l[1] and v1<l[2]):
82                         n2[i]+=1
83                     elif(v1>=l[2] and v1<l[3]):
84                         n3[i]+=1
85                     elif(v1>=l[3] and v1<l[4]):
86                         n4[i]+=1
87     return(n1,n2,n3,n4)
88
89 result=pd.DataFrame({"Station":[],"f0":[],"f1":[],"f2":[],"f3":[],"Σ":[]})
90 for d in df['Station_Name']:
91     try:
92         n=check_4casts(xyz,xyz24,st=d)
93         for i in range(4):
94             new_row1 = pd.DataFrame({"Station":[d],"f0":n[i][0],"f1":n[i][1],"f2":n[i][2],"f3":n[i][3],"Σ":sum(n[i])})
95             result= pd.concat([result,new_row1], ignore_index=True)
96             logger.info(f"Station {d} OK")
97     except:
98         logger.debug(f"{d} Error reading data")
99
100 #запись результатов в фай
101 with pd.ExcelWriter("grad5.xlsx",if_sheet_exists="overlay",mode="a",engine="openpyxl") as writer:
102     result.to_excel(writer,sheet_name="multifactor-48",index=False)

```

Приложение Е Исходный код для получения координат узел сетки на Фортран

```
program xyz
implicit none
integer ::i,j,k,m,n1,n2,n3
character(len=100)::xx,tst,arg,outfile
real,dimension(:),allocatable::u,v
logical :: exists
print*, "*****"
print*, "WRITTEN BY NSABIMANA SHABANI,RSHU,2025 JAN 8"
print*, "EXTRACTING lon ,lat grid cordinates from WRF .ctl file"
print*, "file must not be empty and with .ctl extension "
print*, "*****"
print*, 'Enter outputfilename (.csv or .txt)then <ENTER> or <RETURN> to continue'
read(*,*) outfile
call get_command_argument(1, arg)
tst=arg
if (len(trim(tst))==0) then
    print*, "Please enter a valid name :"
    read(*,*)tst
    goto 112
else
    continue
end if
112 inquire(file=tst,exist=exists)
if (exists) then
    open (100, file=tst,status='old')
    print*, ">>>>>>>>Control file.ctl====>",trim(tst),">>>>>>>>>OK"
    continue
else
    print*, "File name <--",trim(tst),"--> not found"
    print*, "Try another name:"
    read(*,*)tst
    goto 112
end if
open (1, file='xdef.txt',status='old')
```

```

open (2, file='ydef.txt',status='old')
!open (3, file='ydef_new.txt',status='new')
!open (100, file='mar23-03-03.ctl',status='old')

read(1,*)
read(2,*)

do i=1,169
  !read(1,*) x(i)
end do
close(1)
do j=1,199
  !read(2,*) y(j)
end do
close(2)

k=0
do j=1,199
  do i=1,169
    k=k+1
    !print*, 'node ',k,x(i),y(j)
    !write(3,*) k,x(i),y(j)
  end do
end do
!close(3)
m=0

do i=1,2000
  !print*, "i=",i
  read(100,*) xx
  if(index(xx, "xdef") == 1)then
    n1=i+1
  elseif (index(xx, "ydef") == 1) then
    n2=i-1
  end if
end do

```

```

elseif (index(xx, "zdef") == 1) then
    n3=i-1
    !call read_xy(n1,n2,n3,100,x,y)
    close(100)
    exit
else
    m=m+1
endif
end do

allocate(u(n2-n1+1))
allocate(v(n3-n2-1))
call read_xy(n1,n2,n3,100,tst,u,v)

k=0
do j=1,size(v)
    do i=1,size(u)
        k=k+1
        !print*, 'node ',k,'x=',u(i),'y=',v(j)
    end do
end do

deallocate(u)
deallocate(v)
print*, ""
print*, "*****"
print*, ""
print*, ">>>>>>>>SUCCESSFULLY>>>PROCESSED>>>",k,">>NODES<===",trim(tst)

print*, ""
print*, ">>>>>>>>RESULTS>>>SAVED>>>TO>>>>>>>> ",outfile,">>"
end program xyz

subroutine read_xy(nx,ny,nz,nfile,ff,x,y)
    implicit none

```

```

integer ::i,nx,ny,nz,nfile
real , dimension(ny-nx+1)::x
real , dimension(nz-ny-1)::y
character(len=100)::xx,yy,ff
print*,"Grid Parameters"
print*, "nx=",ny-nx+1
print*, "ny=",nz-ny-1
print*,"Grid nodes",(ny-nx+1)*(nz-ny-1)
print*,"Grid Parameters"

open (nfile, file=ff,status='old')

do i=1,nz
    if(i<=ny .and. i>=nx) then
        read(nfile,*) x(i-nx+1)
    elseif (i>=ny+2) then
        read(nfile,*) y(i-ny-1)
    else
        read(nfile,*)
    end if

end do
close(nfile)
end subroutine

```

Приложение Ж Форма задания данных для построения матрицы сопряженности

A17						Muriza
	A	B	C	D	E	F
1	Station_Name	1	2	3	4	5
2	Bugarama	10,2	0,0	1,9	39,4	23,3
3	Bujumbura	0,0	0,0	0,0	2,5	6,2
4	Cankuzo	67,0	1,8	63,0	5,2	13,8
5	Giheta	0,0	2,0	0,0	12,9	11,8
6	Gisozi	6,8	0,0	0,0	3,5	6,8
7	Gitega	0,0	2,3	2,2	3,2	13,2
8	Imbo	0,5	0,0	0,0	0,5	3,0
9	Karusi	0,3	0,0	13,2	0,0	8,0
10	Kinyinya	5,4	2,8	0,2	3,1	16,4
11	Kirundo	18,0	0,0	2,9	0,0	19,0
12	Mabayi	42,3	7,2	6,8	2,9	18,8
13	Makamba	0,0	1,5	0,0	13,1	24,7
14	Mparambo	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
15	Mpota-Tora	0,4	0,3	31,0	2,4	3,0
16	Mugera					
17	Muriza					
18	Musasa	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0
19	Musongati					
20	Muyaga	2,7	0,0	5,4	0,0	9,8
21	Muyinga	14,0	12,0	0,0	0,0	0,4
22	Nyamuswaga	28,7	3,1	0,7	13,9	3,1
23	Nyanza-Lac	1,2	4,4	0,0	0,0	1,1
24	Ruvyironza	21,5	0,0	6,0	0,5	7,3
obs		Feuil1	24h	48h	72h	(+)

T17							0,00288979
	A	B	C	D	E	F	G
1	24H	1	2	3	4	5	6
2	Bugarama	13,210	18,835	16,7766	11,341	47,766	22,191
3	Bujumbura	0,000	0,000	7,66E-07	0,000	1,906	0,000
4	Cankuzo	6,034	3,756	0,00133171	5,542	0,000	0,000
5	Giheta	8,173	9,384	13,7331	46,206	28,363	6,373
6	Gisozi	6,015	5,581	20,0653	34,750	29,439	6,559
7	Gitega	2,410	6,847	29,3496	28,645	33,319	15,327
8	Imbo	0,000	0,000	5,87E-09	0,000	0,077	0,000
9	Karusi	3,854	7,451	16,5922	15,981	6,334	2,904
10	Kinyinya	0,006	1,920	8,40653	5,342	16,199	0,005
11	Kirundo	9,935	6,061	5,80383	18,139	22,158	11,227
12	Mabayi	4,311	34,606	21,9578	5,656	31,348	20,584
13	Makamba	7,875	17,050	1,99E-06	0,000	28,460	6,493
14	Mparambo	0,000	2,741	7,51E-05	0,000	4,641	0,000
15	Mpota-Tora	15,652	13,929	5,43085	23,012	29,014	9,402
16	Mugera	1,788	10,113	20,6551	21,788	15,617	7,096
17	Muriza	3,779	16,000	7,38039	4,691	6,964	0,000
18	Musasa	1,609	0,000	13,3665	3,615	2,158	0,118
19	Muyaga	4,993	5,494	4,13303	6,064	1,539	0,285
20	Muyinga	4,231	4,180	10,3503	6,377	13,175	2,253
21	Nyanza-Lac	0,000	0,964	8,80E-06	0,000	0,076	0,610
22	Ruvyironza	11,738	23,504	13,594	13,988	28,046	18,843
23	Ruyigi	5,893	11,072	12,3938	8,570	0,000	0,000
24	Rwegura	22,549	13,417	16,7067	41,226	58,208	17,991
25							
◀ ▶ obs Feuil1 24h 48h 72h ⊕							